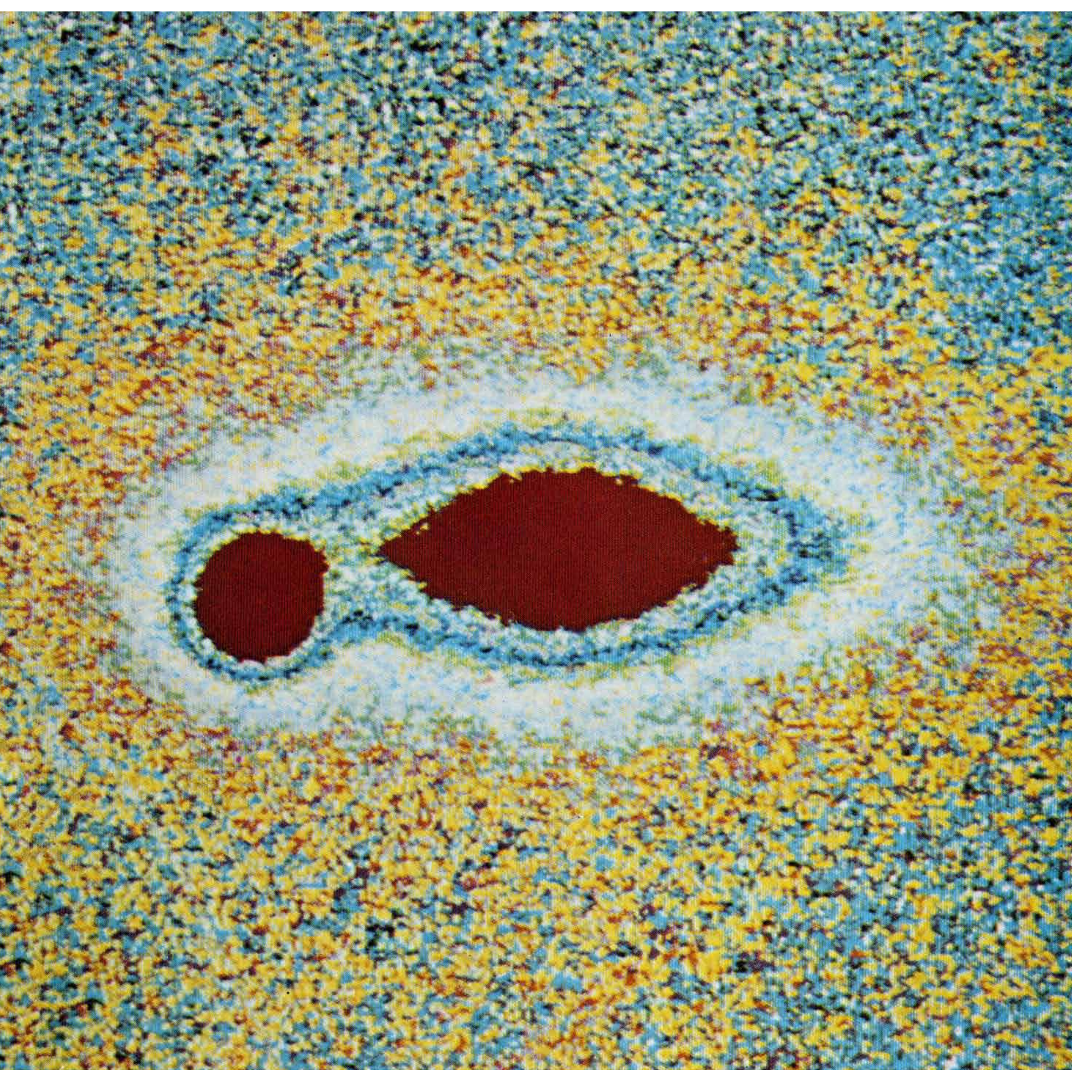
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



SUPERNOVAS EN OTRAS GALAXIAS

Febrero 1977

140 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 5

Enero 1977

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

4 **EL REPROCESADO DE LOS COMBUSTIBLES NUCLEARES, William P. Bebbington**
No hay una industria eficaz que elimine los productos de fisión del plutonio y recupere el uranio.

18 **POSTEFECTOS NEGATIVOS EN LA PERCEPCION VISUAL, Olga Eizner Favreau y Michael C. Corballis,** Las ilusiones ópticas informan con respecto a los sistemas de percepción.

26 **HELIO 3 SUPERFLUIDO, N. David Mermin y David M. Lee**
A milésimas de grado sobre el cero absoluto, este isótopo del helio tiene propiedades únicas.

40 **EL CONTROL DE LA MARCHA, Keir Pearson**
Los mecanismos que generan los movimientos de las extremidades en el gato y en la cucaracha.

52 **SUPERNOVAS EN OTRAS GALAXIAS, Robert P. Kirshner**
La rareza de estos cataclismos estelares hace que se estudien mejor observando otras galaxias.

66 **INSERCION DEL ADN VIRICO EN EL ADN DE LA CELULA HUESPED, Allan M. Campbell,** Virus que coexisten apaciblemente con la célula huésped durante largo tiempo.

78 **EL ARTE DE LOS IBEROS: ESCULTURA Y PINTURA, Miquel Tarradell**
Menos conocido que el arte de griegos y romanos, el ibero surge poderoso, con caracteres propios.

92 **DATACION MEDIANTE HUELLAS DE FISION, J. D. Macdougall**
La fisión de trazas de uranio en los minerales informa sobre su edad, y abarca un largo período.

3 AUTORES
38 CIENCIA Y SOCIEDAD
104 JUEGOS MATEMATICOS
111 TALLER Y LABORATORIO
118 LIBROS
120 BIBLIOGRAFIA

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15
ESPAÑA

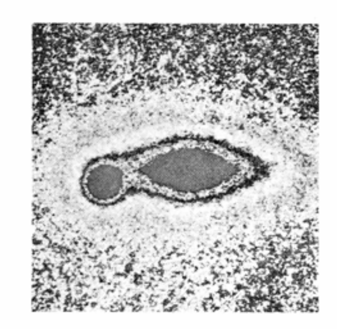
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Fidel Cunill: *El reprocesado de los combustibles nucleares;* Monique Robert: *Postefectos negativos de la percepción visual;* Ramón Pascual: *Helio 3 superfluido;* Adrià Casinos: *El control de la marcha;* Luis Mas: *Supernovas en otras galaxias;* Jesús Guinea: *Inserción del ADN vírico en el ADN de la célula huésped;* Gerardo Espinosa: *Datación mediante huellas de fisión;* Andrés Muñoz Machado: *Taller y laboratorio;* Enrique Trillas y Teresa Riera: *Juegos matemáticos.*

Libros:

Tito A. Varela



LA PORTADA

La ilustración de la cubierta es un mapa luminoso de una supernova descubierta en el mes de junio de 1975, en una galaxia perteneciente a la constelación de la Osa Mayor (véase "Supernovas en otras galaxias", de Robert P. Kirshner, página 52). La supernova, que consiste en la explosión catastrófica de una estrella al final de su vida, es la zona redondeada y roja de la izquierda; el cuerpo principal de la galaxia es la zona alargada y roja de la derecha. El mapa se elaboró a partir de una placa fotográfica del objeto hecha por Howard French en el Kitt Peak National Observatory, en Arizona. La densidad de la placa se midió con un microdensímetro, y se analizó como si la placa constara de cuadrados finísimos de 20 micrometros de lado, asignándosele un número a la densidad de cada cuadrado. Los números sirvieron para hacer una demostración en la pantalla de un televisor en color, que pertenece al Kitt Peak Interactive Picture Processing System. Cada color corresponde a un número de densidad; el rojo representa aquí las áreas más brillantes y el azul las más obscuras.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1.540 pesetas
Seis meses (6 números): 800 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números); 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
160 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
225 pesetas.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

La fotografía de la cubierta es cortesía de Robert P. Kirshner

Página	Fuente	Página	Fuente
5	British Nuclear Fuels Ltd.	75	Madeline C. Wu and Norman R. Davidson, Cal. Tech. Jerome Kuhl
6-13	Dan Todd	76	Jerome Kuhl
14	Dan Todd U.S. Energy Research and Develop. Ad.	78-82	Museo Arqueológico Nacional
19-24	Jerome Kuhl	83-86	Museo de Prehistoria de Valencia
27-36	George V. Kelvin	87	Miquel Tarradell
41	SCIENTIFIC AMERICAN	88	Museo de La Alcudia de Elche
42-50	Alan D. Iselin	93	J. D. Macdougall, Scripps Institution of Oceanography
52	Charles T. Kowal, Cal. Tech.	94-96	Allen Beechel
54-55	Tom Prentiss	97	J. D. Macdougall, Scripps Inst. Ocean.
56-61	Allen Beechel	98	Allen Beechel
66	William C. Earnshaw and Philip A. Youdarian, MIT	99	Devendra Lal, Scripps Inst. Ocean.
68-70	Jerome Kuhl	100	J. D. Macdougall, Scripps Inst. Ocean.
71	Jerome Kuhl Elizabeth A. Raleigh, MIT	105-110	Andrew Christie
72-73	Jerome Kuhl		

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-15
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda. Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

WILLIAM P. BEBBINGTON ("El reprocesado de combustibles nucleares") se retiró en 1975, después de haber trabajado durante treinta y cinco años en E. I. du Pont de Nemours and Company. Entró en Du Pont tras graduarse en química y doctorarse en ingeniería química por la Universidad de Cornell. Durante la Segunda Guerra Mundial trabajó en el diseño de plantas de agua pesada para el proyecto Manhattan. Desde 1945 hasta 1950 estuvo entregado a la economía y a la planificación de plantas de agua pesada. Pasó dos años en la Atomic Energy Division of Du Pont, trabajando en el diseño de plantas de agua pesada. En 1952 se trasladó a la planta de Savannah River, con el cargo de superintendente técnico. Ocupó otros cargos, retirándose mientras desempeñaba el de superintendente. Sus principales aficiones, aparte de la tecnología nuclear, son la botánica y la ecología vegetal.

OLGA EIZNER FAVREAU Y MICHAEL C. CORBALLIS ("Postefectos negativos en la percepción visual") son profesora ayudante de psicología en la Universidad de Montreal y profesor de psicología en la Universidad de McGill, respectivamente. Favreau nació y se educó en Montreal y consiguió su Ph. D. en McGill, en 1973. Entró a formar parte de la facultad de Montreal en 1974. Sus trabajos sobre la percepción visual surgieron de su interés por la psicología y por las artes visuales. También constituye una de sus inquietudes la posición de la mujer en la sociedad, lo que le ha conducido a examinar las investigaciones sobre las diferencias de habilidad que corresponden a una diferencia de sexo. Acaba de cumplirse un período de un año desde que entró como miembro de la Canadian Psychological Association's Task Force, que trabaja sobre el Status of Women in Psychology, y en la que ella realizó un estudio sobre los prejuicios inherentes a la investigación sobre las diferencias entre sexos. Corballis nació en Nueva Zelanda pero posee nacionalidad canadiense. Después de graduarse en matemáticas en el Victoria University College de Nueva Zelanda, en 1959, se pasó a la psicología, graduándose en ésta en 1962 en la Universidad de Auckland. Tres años más tarde, obtuvo el doctorado en Psicología por McGill. Tras un breve período de docencia en Auckland, volvió a McGill en calidad de miembro del claustro de la facultad. A Corballis le interesan la mayoría de los aspectos de la psicología experimental humana y, el año pasado, Iban L. Beale y él han publicado un libro titulado *The Psychology of Left and Right*.

N. DAVID MERMIN y DAVID M. LEE ("Helio 3 superfluido") enseñan física en la Universidad de Cornell. Mermin se graduó en matemáticas por la Universidad de Harvard en 1956, en cuyo centro permaneció hasta obtener el doctorado en física en 1961. Desde 1964 pertenece al claustro de física de la Universidad de Cornell, donde profesa física teórica del estado sólido. Es autor de *Space and Time in Special Relativity*, y coautor (con N. W. Aschcroft) de un texto introductorio fundamental, *Solid State Physics*. Lee se graduó en física por la Universidad de Harvard en 1952. Tras el servicio militar, volvió de nuevo al estudio de la física, licenciándose por la Universidad de Connecticut en 1955 y doctorándose en la de Oale en 1959. A partir de ese momento se incorporó al claustro de la facultad de Cornell. En calidad de codescubridor de las nuevas fases superfluidas del helio 3, se le ha concedido el Simon Prize por parte del British Institute of Physics (juntamente con sus colegas Robert C. Richardson, de Cornell, y Douglas D. Osheroff, de los Bell Laboratories).

KEIR PEARSON ("El control de la marcha") es profesor adjunto de fisiología en la Universidad de Alberta. Nacido en Tasmania, se graduó en ingeniería eléctrica por la Universidad de Tasmania, en 1964, año en que recibió una beca Rhodes, para proseguir sus estudios en la Universidad de Oxford. "Empecé trabajando en investigaciones sobre interacciones en semiconductores de microondas", escribe, "pero muy pronto perdí el interés por ese campo de trabajo. Luego, una serie de acontecimientos afortunados me introdujeron en el fascinante mundo de la neurofisiología de invertebrados y en el análisis de los fenómenos eléctricos en neuronas aisladas y en pequeños sistemas de células nerviosas". Cambió de rumbo y terminó su doctorado en neurofisiología en 1968. De 1967 a 1969 trabajó como becario en el Merton College de Oxford.

ROBERT P. KIRSHNER ("Supernovas en otras galaxias") es profesor adjunto de astronomía por la Universidad de Michigan, en cuyo claustro se incorporó tras dos años de becario postdoctoral en el Kitt Peak National Observatory, Arizona. Durante ese período trabajó en problemas relacionados con supernovas y remanentes de supernovas, en la dinámica de grupos de galaxias y en la luminosidad de las galaxias en relación con su distancia. El grado de doctor lo obtuvo en 1974 por el Instituto de Tecnología de California, habiéndose licenciado en Harvard en 1970.

ALLAN M. CAMPBELL ("Inserción del ADN vírico en el ADN de la célula huésped") es profesor de Ciencias biológicas en la Universidad de Stanford. Se doctoró en 1953 por la Universidad de Illinois, pasando más tarde a desempeñar enseñanzas de microbiología en la Universidad de Michigan. En 1958 se trasladó a la Universidad de Rochester como profesor de biología; finalmente, en 1968, regresó a la Universidad de Stanford. En 1971 ingresó en la Academia Nacional de Ciencias y en la Academia Americana de Artes y Ciencias.

MIQUEL TARRADELL ("El arte de los iberos: escultura y pintura") es catedrático de arqueología de la Universidad de Barcelona. Estudió en ese mismo centro y amplió estudios en Nueva York y París. Fue director de excavaciones del antiguo Protectorado español en Marruecos y, posteriormente, catedrático de la Universidad de Valencia. Es miembro del Institut d'Estudis Catalans. Ha realizado excavaciones en varias zonas mediterráneas: Cartago, Marruecos, Mallorca, país valenciano y Cataluña, dedicándose especialmente a las civilizaciones del Mediterráneo occidental del primer milenio a. C. (fenicios, púnicos, iberos, etc.).

J. D. MACDOUGALL ("Datación mediante huellas de fisión") es profesor adjunto del Geological Research Division, de la Scripps Institution of Oceanography, de la Universidad de San Diego, California. Nacido en Toronto, se graduó en geología por su Universidad natal en 1967. Se licenció en 1968 por la Mac Master University con un trabajo de dirección de investigación geoquímica en las islas árticas de Canadá. Estuvo seis meses trabajando en el departamento de geofísica del Tata Institute of Fundamental Research, de Bombay, y dos años en la Universidad de Berkeley.

El reprocesado de los combustibles nucleares

La economía de la energía de fisión mejoraría si el combustible gastado se procesara, para eliminar los productos de fisión y el plutonio y recuperar el uranio

William P. Bebbington

A los diecinueve años de la puesta en servicio, en Shippingport, Pa., de la primera central norteamericana de energía nuclear, los Estados Unidos no tienen todavía instalaciones comerciales autorizadas para recuperar el plutonio y el uranio 235, no consumidos, del combustible gastado en los reactores nucleares. Solamente se autorizó a una planta privada para realizarlo, la cual se paró en 1972 por ampliación y modificaciones. Sus propietarios, Nuclear Fuel Services, Inc., de West Valley, Nueva York, han retirado su petición de autorización para la reapertura. Entre 1966 y 1972 la planta reprocesó cerca de 650 toneladas de combustible gastado. En Barnwell County, Carolina del Sur, se han terminado hace un año las instalaciones de separación de una planta de reprocesado, cuyo costo asciende a 500 millones de dólares, con una capacidad de 1500 toneladas por año, propiedad de Allied-General Nuclear Services. Los propietarios están esperando la autorización de la Nuclear Regulatory Commission, que a su vez depende de las decisiones del Gobierno sobre el almacenaje de residuos nucleares y de las normas que regulan la utilización del plutonio recuperado. Gran Bretaña, Francia y otros países reprocesan el combustible gastado en los reactores nucleares en instalaciones del Gobierno, pero ésta no es la política seguida en Estados Unidos. Como consecuencia, el combustible gastado procedente de los 62 reactores de fisión de la nación está almacenado en lugares adecuados. El inventario actual se acerca a las 2500 toneladas métricas.

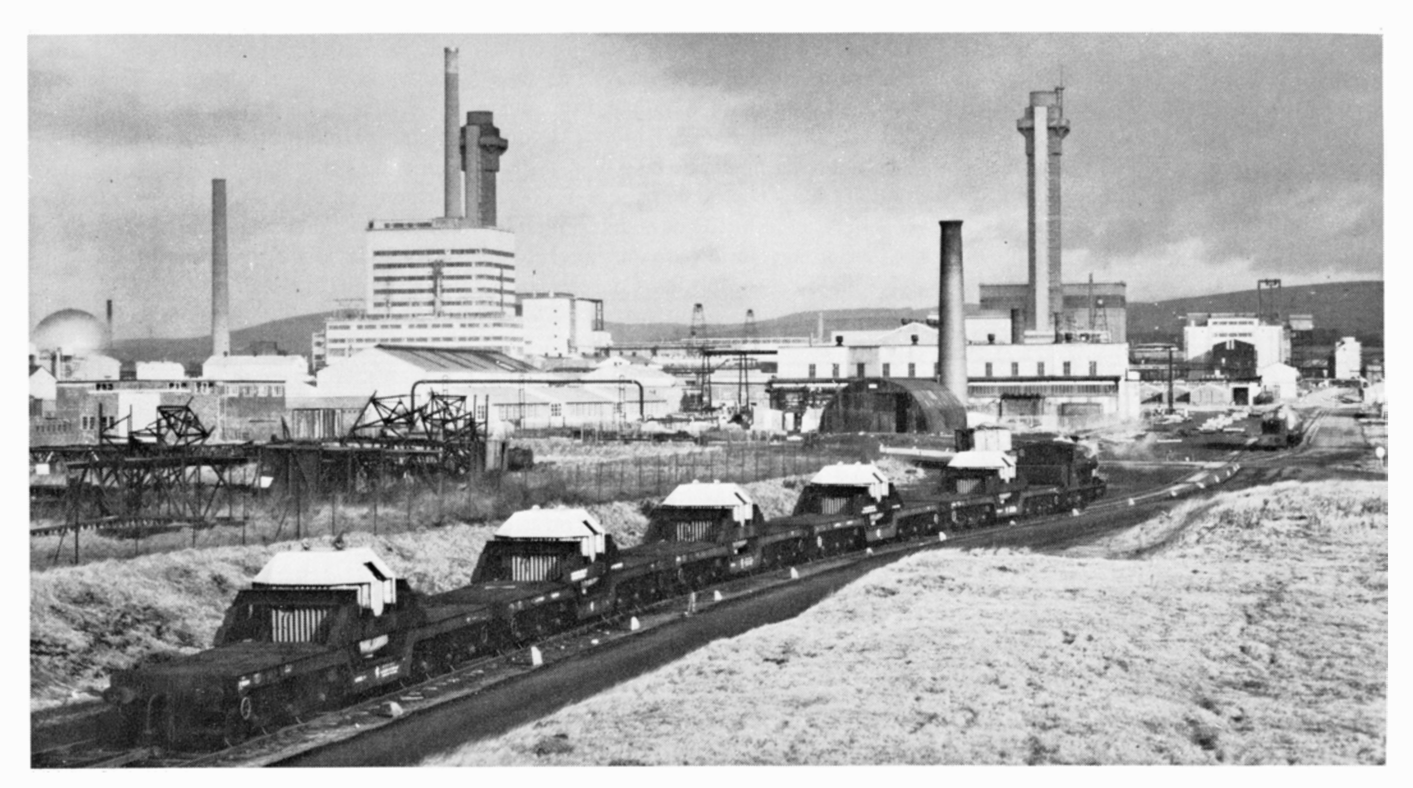
A diferencia del carbón, el combustible fisionable de un reactor nuclear no puede ser "consumido" hasta que todo lo que quede sea esencialmente una ceniza sin valor e inocua. El combustible alimento de los reactores nucleares norteamericanos contiene normalmente entre 2,5 y 3,5 por ciento del isótopo uranio 235 fisionable, habiéndose enriquecido el valor natural de 0,7 por ciento de uranio 235 mediante el proceso de difusión gaseosa. El resto del uranio en el combustible (y en el mineral) es en su mayoría el isótopo uranio 238 no fisionable. Cuando se fisionan los núcleos del uranio 235 en el reactor, dan origen a una gran variedad de productos radiactivos, muchos de los cuales actúan como "venenos" de la fisión, absorbiendo los neutrones necesarios para mantener la reacción en cadena. Al propio tiempo, el contenido de uranio 235 del combustible ha disminuido hasta el 1 por ciento aproximadamente, y así los efectos combinados del agotamiento y del envenenamiento por los subproductos hacen necesaria la sustitución del combustible.

Además del uranio 235, el combustible gastado contiene entre 0,7 y un 1 por ciento de plutonio 239, sintetizado del uranio 238 por la absorción de un neutrón. El plutonio 239 es más fisionable todavía que el uranio 235; y el Gobierno federal está decidiendo ahora si se aprueba o no el uso de combustible para reactores nucleares que contenga una mezcla de los dos isótopos. El material fisionable recuperado del combustible gastado de tres reactores es suficiente para alimentar un cuarto reactor. La economía de la industria de la energía nuclear se verá fuertemente afectada por la decisión que permita o no el uso de combustibles mezclados recirculados.

Cuando se para un reactor, el combustible gastado contiene unos 450 núcleos producidos sintéticamente, uranio 237 y neptunio 239 incluidos, que se transforman en neptunio 237 y plutonio 239. Los métodos para separar químicamente el plutonio del uranio y de sus subproductos de fisión se desarrollaron durante la segunda guerra mundial para proporcionar plutonio altamente purificado para las bombas atómicas. El plutonio 239 se separaba del uranio metálico no enriquecido que se utilizaba como combustible de los reactores del distrito de Manhattan en Hanford Wash. El calor de los reactores se eliminaba con agua de refrigeración, e inicialmente sólo se recuperaba el plutonio.

Uranio, neptunio y plutonio son miembros de la serie de los elementos actínidos, cuyas propiedades químicas son similares a las propiedades de la serie de los lantánidos de los elementos de las tierras raras. Algunos meses antes de que Enrico Fermi y sus colaboradores demostraran que el plutonio podía obtenerse por una reacción en cadena en una pila de uranio, Glenn T. Seaborg y colaboradores separaron y purificaron varios microgramos de plutonio puro que se habían obtenido por bombardeo de uranio en un ciclotrón. Los estudios preliminares revelaron que el plutonio tenía propiedades químicas que variaban con su estado de oxidación, y ello podría utilizarse en procesos de separación. Entre tales propiedades útiles se incluían la solubilidad de los fosfatos y fluoruros de plutonio en soluciones acuosas (comparadas con la insolubilidad de los fosfatos y fluoruros de los productos de fisión) y el hecho de que ciertos iones plutonio podrían extraerse con disolventes orgánicos.

Los productos de fisión son isótopos de los elementos comprendidos entre el que tiene número atómico 30 (cinc) y el



LA MAYOR PLANTA DE REPROCESADO del mundo, destinada a la recuperación del uranio y plutonio del combustible gastado en los reactores de energía nuclear, es la de Windscale, situada en Seascale, en la costa occidental de Inglaterra. Las instalaciones se construyeron inicialmente para reprocesar uranio procedente de los primeros reactores británicos productores de plutonio, instalados a corta distancia. El edificio de varias plantas, con la chimenea más alta, es la instalación primitiva de extracción de plutonio. Su elevada construcción venía exigida por la necesidad de que las corrientes de las soluciones acuosa y orgánica circulen en contracorriente por gravedad a través de las columnas de extracción. Los vagones en primer plano aportan el combustible nuclear gastado de las centrales nucleares explotadas por la United Kingdom Central Electricity Generating Board. La planta de Windscale, dirigida por la British Nuclear Fuels Ltd., propiedad del Gobierno, puede procesar de 2000 a 2500 toneladas anuales de combustible; asimismo, procesa combustibles de otros países.



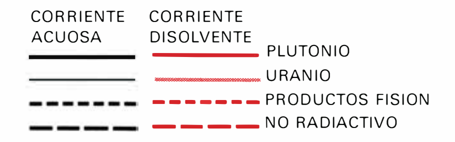
LA NAVE DE OPERACION EN WINDSCALE soporta filas de motores que hacen girar los agitadores de los "mezcladores-sedimentadores", que son cámaras horizontales de múltiples etapas que desempeñan la misma función que las columnas de extracción, produciendo un contacto íntimo entre las soluciones orgánica y acuosa *(véase la ilustración de la página 9)*. Los operadores de la planta están protegidos de la intensa radiación por un grueso piso de hormigón en la base de los mezcladores-sedimentadores. El equipo que puede necesitar reparaciones o sustituciones está encima de la nave. Las células del mezclador-sedimentador están diseñadas de tal modo que no se puede entrar en ellas.

que tiene número atómico 66 (disprosio), la mayoría de los cuales son radiactivos, cuyos promedios de vida oscilan desde menos de un segundo hasta miles de años. Los productos de fisión son la principal fuente de calor y radiación del combustible gastado. Solamente una docena, más o menos, combinan una radiación interna y un promedio de vida largo con propiedades físicas y químicas que serían perjudiciales en el procesado o en la disposición última de los residuos.

La primera etapa en el tratamiento del combustible nuclear gastado consiste en almacenarlo durante varios meses en piscinas llenas de agua en la central nuclear. Durante ese período, la radiactividad y la producción de calor disminuyen en unas 1000 veces, aproximadamente. Por ejemplo, la radiactividad del iodo 131, que tiene una vida media de 8,14 días, disminuye entre 3000 y 30.000 veces. En consecuencia, el iodo 131 es el determinante del tiempo necesario para enfriar el combustible; la descomposición del elemento volátil lo elimina como problema en el reprocesado.

Los diseñadores de las plantas de separación química en Hanford reconocieron que las innovaciones tecnológicas necesarias para dirigir las operaciones químicas por control remoto desde fuera de las gruesas paredes de hormigón eran ya bastante exigentes, sin pretender alcanzar sutilezas tales como la optimización del proceso. Ellos escogieron las operaciones discontinuas sencillas, desarrolladas por Seaborg al trabajar con cantidades del orden de microgramos de plutonio. En resumen, las barras de uranio se disolvían primero en ácido, obteniéndose una solución acuosa en la que los iones plutonio estaban altamente diluidos. Se añadían bismuto y lantano como "portadores", de modo que cuando el fosfato de bismuto y el fluoruro de lantano se precipitaban posteriormente, arrastrasen con ellos el fosfato y fluoruro de plutonio en cantidades de precipitado suficientes para su separación.

Por repetidas disoluciones y precipitaciones, con otros cambios en el estado de oxidación, el plutonio se separaba del uranio y de los productos de fisión. Se utilizaron tanques sencillos para las disoluciones y precipitaciones; se emplearon centrífugas para la separación de los precipitados.



PRIMER CICLO
SEGUNDO CICLO DE URANIO
ACIDO NITRICO CONCENTRADO
ACIDO NITRICO REDUCTOR
AGUA
ACIDO NITRICO
AGUA
ALIMENTO CLARIFICADO
Pu^{4+}
PRODUCTOS DE FISION
U^{6+}
EXTRACCION
PARTICION
LAVADO
EXTRACCION
LAVADO
Pu^{3+}
U^{6+}
RESIDUO DE ALTA ACTIVIDAD
RESIDUO DE ACTIVIDAD INTERMEDIA
LAVADO DISOLVENTE
LAVADO DISOLVENTE
RESIDUO BAJA ACTIVIDAD
RESIDUO DE BAJA ACTIVIDAD
PRODUCTO DE URANIO

EL PROCESO PUREX para recuperar uranio y plutonio de los combustibles gastados en los reactores nucleares, emplea PTB (fosfato de tributilo) disuelto en un hidrocarburo tipo queroseno en calidad de agente de separación. Cuando los iones uranio y plutonio se hallan en un estado de gran deficiencia de electrones, esto es, altamente oxidados, son más solubles en la solución hidrocarburo-PTB que en la solución acuosa. Bajo las mismas condiciones, los centenares de subproductos radiactivos, producidos al fisionarse el uranio 235 en el reactor, son más solubles en la solución acuosa fuertemente ácida que en la solución orgánica. Este diagrama simplificado muestra siete columnas verticales por las que se hace circular en contracorriente, y con un elevado contacto, las soluciones acuosa y orgánica, de modo que puedan separarse eficazmente las sustancias que son más solubles en una solución que en otra. La mezcla alimento que entra en la primera columna de extracción es el combustible gastado en solución acuosa. Además de los subproductos altamente radiactivos contiene cerca de 1 por ciento de uranio 235 no fisionado, más del 90 por ciento del isótopo uranio 238, no fisionable, y entre 0,5 y 1 por ciento de una mezcla de isótopos del plutonio, principalmente plutonio 239 y 240, el primero producido cuando el uranio 238 ha capturado un neutrón y el segundo a partir del plutonio 239 por captura de otro neutrón. Los iones uranio están en un estado de gran oxidación, pues carecen de seis electrones (U^{6+}); los iones plutonio carecen de cuatro electrones (Pu^{4+}). El alimento acuoso entra hacia la mitad de la primera columna de extracción; la solución de PTB entra por el fondo. El uranio y el plutonio son extraídos por el disolvente que fluye hacia arriba; los productos de fisión son "lavados" del disolvente por la corriente acuosa de ácido nítrico que desciende, y salen por el fondo de la columna. La mezcla uranio-plutonio pasa a la segunda columna, o particionador, donde se "lava" el plutonio del disolvente por contacto, en contracorriente, con ácido nítrico que contiene

Los procesos funcionaron bien y con seguridad, sin perjuicios significativos contra la salud de los trabajadores o del medio ambiente. La eliminación de los productos de fisión fue eficaz y se recuperó más del 95 por ciento de plutonio. La capacidad de operación superó tanto las previsiones realizadas que, de las cuatro instalaciones de separación química planeadas, solamente se construyeron tres y únicamente dos entraron en funcionamiento. El uranio no se recuperaba y el volumen de los residuos era grande debido al fosfato de bismuto y al fluoruro de lantano añadidos. Considerando el tiempo que actualmente se necesita para diseñar y construir centrales nucleares, parece casi increíble que transcurrieran solamente dos años y medio entre la demostración inicial de la pila de reacción en cadena, el 2 de diciembre

SEGUNDO CICLO DEL PLUTONIO
ACIDO NITRICO
ACIDO NITRICO Y REDUCTOR
OXIDANTE
Pu^{4+}
EXTRACCION
LAVADO
Pu^{3+}
RESIDUO DE ACTIVIDAD INTERMEDIA
LAVADO DISOLVENTE
RESIDUO DE BAJA ACTIVIDAD
PRODUCTO DE PLUTONIO

un agente reductor que transforma el plutonio al estado 3+ (Pu^{3+}), insolubilizándolo en el disolvente orgánico. Simultáneamente, el disolvente que asciende extrae las últimas trazas de uranio de la solución acuosa de plutonio, que fluye de la parte inferior de la columna de partición. En la tercera columna, el uranio de la solución orgánica se elimina con ácido nítrico diluido. En el segundo ciclo, la extracción y lavado del uranio y plutonio se repiten por separado. A través del sistema, (ciclo primero) el disolvente es atacado por la radiación intensa y por ataque químico. Los productos degradados y los de fisión, pueden ser eliminados.

de 1942, y la explosión de la primera bomba de plutonio, ocurrida el 16 de julio de 1945.

El importante legado de Hanford a la industria de reprocesado de combustibles nucleares fue el concepto de operación y mantenimiento remotos, junto con las innovaciones del diseño ingenieril que se necesitaron para aplicarlos. Los edificios eran largas estructuras con gruesos muros de hormigón que encerraban los "desfiladeros" o espacios de proceso. Las tuberías se empotraron en los muros y terminaban en conexiones que estaban localizadas con precisión en posiciones normalizadas en el interior y cerca de la parte superior de los "desfiladeros". Se conectaban con el equipo de proceso por medio de enlaces fabricados con precisión que podían ser colocados y retirados por grúas que se movían sobre raíles a lo largo de los "desfiladeros". El operador de la grúa, protegido por fuertes pantallas contra la radiación y observando su trabajo a través de un periscopio, podía separar y reinstalar cualquier pieza del equipo usando llaves de choque para manipular las conexiones del final de los enlaces. Todos los líquidos se transportaban por gravedad o por eyectores de chorro de vapor. Se desarrollaron ingeniosas combinaciones de válvulas para asegurar que las líneas de vapor se purgaran con aire, de modo que la condensación no pudiera succionar soluciones radiactivas fuera de los espacios protegidos.

Después de la guerra se realizó un gran esfuerzo para desarrollar procesos técnicamente superiores que pudieran operar de forma continua, mejor que por cargas, y que pudieran recuperar uranio y plutonio con elevados rendimientos. La extracción con disolventes recibió la mayor atención debido a que, previamente, se había aplicado con éxito en la purificación del uranio. En la extracción con disolventes, las soluciones acuosa y orgánica circulan en direcciones opuestas en una columna u otro tipo de cámara de mezcla que disperse una de las soluciones en pequeñas gotas en la otra. En los disolventes que se utilizaron, los iones uranilo hexavalente, $(UO_2)^{++}$, y los iones plutonilo, $PuO_2)^{++}$, junto con los iones plutonio tetravalente, Pu^{4+} (átomos de plutonio de los que se han separado cuatro electrones), son solubles, mientras que los iones plutonio trivalentes, Pu^{3+}, y los iones de los demás productos de fisión no lo son. Por consiguiente, el disolvente puede extraer el uranio y el plutonio (en sus formas altamente oxidadas) de la solución alimento acuosa, que retiene la mayoría de los productos de fisión. Para separar el plutonio del uranio, se reduce el plutonio a la forma trivalente Pu^{3+}, insolubilizándolo en el disolvente, que en tal caso contiene todo el uranio.

Este movimiento en los estados de oxidación dio origen al nombre de Redox para el primer proceso de extracción con disolventes que se aplicó en gran escala. El proceso Redox, con hexona (metil-isobutil-cetona) como disolvente orgánico, se puso en marcha en Hanford en 1951. Otros procesos posteriores con disolventes distintos sacaron partido del mismo ciclo de oxidación-reducción. Para forzar la disolución en el disolvente de los iones uranio y plutonio de elevado grado de oxidación se necesitan elevadas concentraciones de iones nitrato. En la mayoría de los procesos químicos se utiliza ácido nítrico para suministrar iones nitrato. Sin embargo, puesto que en el proceso Redox el disolvente hexona se descompone para grandes concentraciones de ácido nítrico, se utilizó nitrato de aluminio en su lugar. Este aumentaba enormemente la cantidad de residuo altamente radiactivo. El disolvente hexona tenía también la desventaja de ser altamente volátil e inflamable.

Poco después de la guerra, Gran Bretaña construyó reactores de producción y una planta de separación en Windscale, en Cumbria. Como disolvente de extracción utilizaron butex (β,β' dibutoxi-dietil-éter). El butex es químicamente estable en ácido nítrico concentrado, no siendo necesario recurrir al nitrato de aluminio. Es también más denso y menos volátil que la hexona, pero es más caro. Al principio de los años cincuenta, cuando Estados Unidos construyó una nueva e importante planta para la producción de plutonio y de tritio, isótopo del hidrógeno, en el Savannah-River cerca de Aiken, Carolina del Sur, se seleccionó fosfato de tributilo (PTB) como disolvente para el proceso de extracción. Cuando se disuelve el PTB en un disolvente tal como el queroseno, es aún más estable químicamente que el butex, más barato que la hexona y da mejores separaciones que ambos. El proceso con PTB, o Purex, se utiliza actualmente en todas las plantas de reprocesado.

El proceso Purex comprende tres ciclos de extracción con PTB. La extracción viene precedida por una etapa "final de cabeza" (head end), en donde el combustible gastado se disuelve y se clarifica la solución resultante, proceso que varía con la naturaleza del combustible y del revestimiento de las barras de combustible. En la planta Savannah-River,

donde los reactores se alimentan con uranio metálico natural revestido de aluminio, el revestimiento se elimina disolviéndolo con una solución acuosa de hidróxido sódico y nitrato sódico. Los componentes del óxido de uranio que aprovisionan a todos los reactores nucleares norteamericanos están embutidos en largos y delgados tubos, hechos de acero inoxidable o de una aleación de circonio "Zircaloy". Estas barras se preparan para su tratamiento cortando los tubos en pequeñas fracciones y disolviendo el óxido ("corte-lixiviación"). (Se ha demostrado la disolución química y electroquímica de las barras de combustible de óxido, pero necesita equipos de proceso fabricados con aleaciones que sean altamente resistentes a la corrosión y además aumenta el volumen de líquido residual.) Las disoluciones que proceden de los aparatos de disolución suelen centrifugarse para separar los sólidos finamente divididos que interferirían la extracción. Algunas veces, se precipitan sustancias tales como el óxido de manganeso para ayudar a clarificar la disolución y arrastrar parte de los productos de fisión.

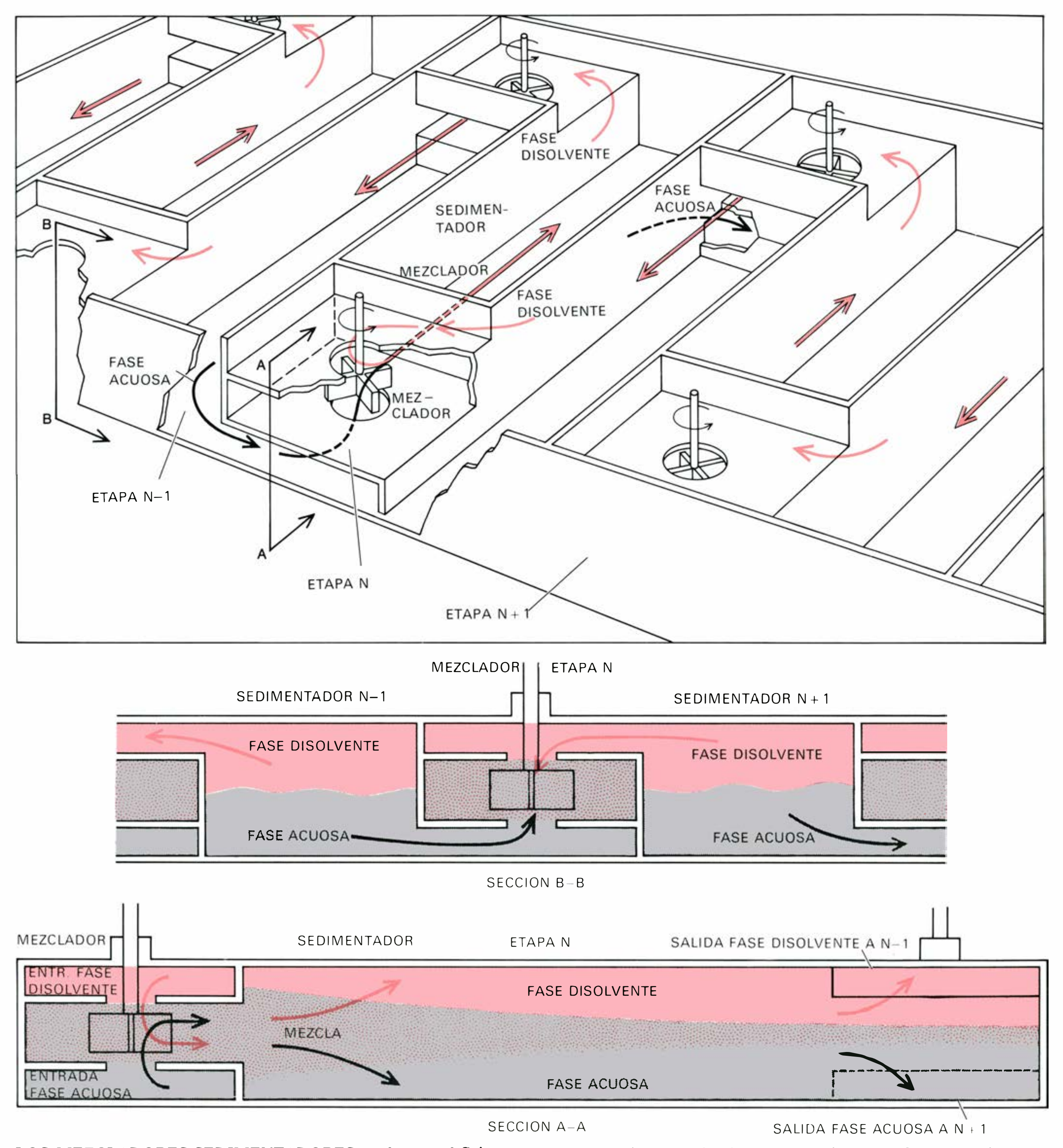
Cuando las corrientes de uranio y plutonio abandonan el proceso Purex, contienen cerca de una millonésima, como mucho, de radiactividad debida a productos de fisión, respecto a la que tenían inicialmente. Con este bajo nivel de radiactividad, los productos de las dos corrientes pueden purificarse posteriormente y convertirse en las formas finales preferidas mediante operaciones químicas convencionales, con una protección contra la radiación relativamente escasa. Se han empleado, alguna que otra vez, operaciones tales como evaporación, intercambio iónico, absorción, precipitación y calcinación. En las plantas del Gobierno norteamericano, el plutonio se reduce a la forma metálica utilizada en el armamento nuclear.

Si se utilizase plutonio como combustible en las centrales de energía nuclear, sería el óxido de plutonio la forma preferida, como ocurre con el óxido de uranio (U_3O_8). Si el uranio se devuelve a las plantas de difusión gaseosa para su enriquecimiento, se le transforma en hexafluoruro de uranio (UF_6), que es un gas a temperatura ambiente. Debido a la gran diferencia entre las formas combustibles, se han adoptado dos procedimientos diferentes con respecto a los residuos. Los residuos de Hanford y Savannah-River se hacen fuertemente alcalinos, lo que permite su almacenamiento en tanques de acero al carbono, que se colocan en bóvedas de hormigón subterráneas. Los residuos de los reactores nucleares se concentran en forma ácida y, por tanto, necesitan recipientes de acero inoxidable.

El proceso Purex, con algunas modificaciones, sirve también para reprocesar los combustibles gastados en los reactores que utilizan uranio altamente enriquecido (como son los reactores de los submarinos nucleares) en los que sólo se producen trazas de plutonio. La planta de reprocesado químico del Idaho National Engineering Laboratory, situada cerca de Idaho Falls, Idaho, reprocesa los combustibles de los reactores de propulsión naval y de diferentes tipos de reactores de investigación. La planta de reprocesado de Idaho difiere marcadamente de las unidades de Hanford y Savannah-River, al haberse diseñado para mantenimiento directo (como opuesto al remoto). El equipo de proceso debe ser descontaminado químicamente, interior y exteriormente, para permitir la entrada a las unidades para efectuar las reparaciones y sustituciones necesarias.

La eficacia del proceso Purex depende enormemente del diseño de los aparatos de extracción del solvente, en el que dos líquidos inmiscibles, uno acuoso y el otro orgánico, se ponen íntimamente en contacto y luego se separan completamente. Esto se hace en un aparato denominado contactor. El aparato más sencillo para la extracción con disolventes en contracorriente es una columna de relleno, que consiste en un tubo vertical que normalmente contiene anillos metálicos o de cerámica que "disgregan" las fases líquidas y las hacen circular tortuo-

LAS COLUMNAS DE EXTRACCION SIMPLE se utilizaron para proporcionar un contacto íntimo entre la solución disolvente y la solución acuosa, en las primeras plantas de reprocesado de combustible gastado. En la columna de la izquierda, el contacto se logra por medio de un relleno de objetos cerámicos o metálicos dispuestos al azar; suelen tener la forma de anillos o codos. La solución acuosa desciende a través de la columna por gravedad; la orgánica, más ligera, asciende. Puede construirse un extractor más pequeño y más eficaz, si se emplea un pistón, o aire a presión, para "pulsar" el fluido en la columna; así, las soluciones se adelantan y atrasan una y otra vez a través de las placas perforadas.

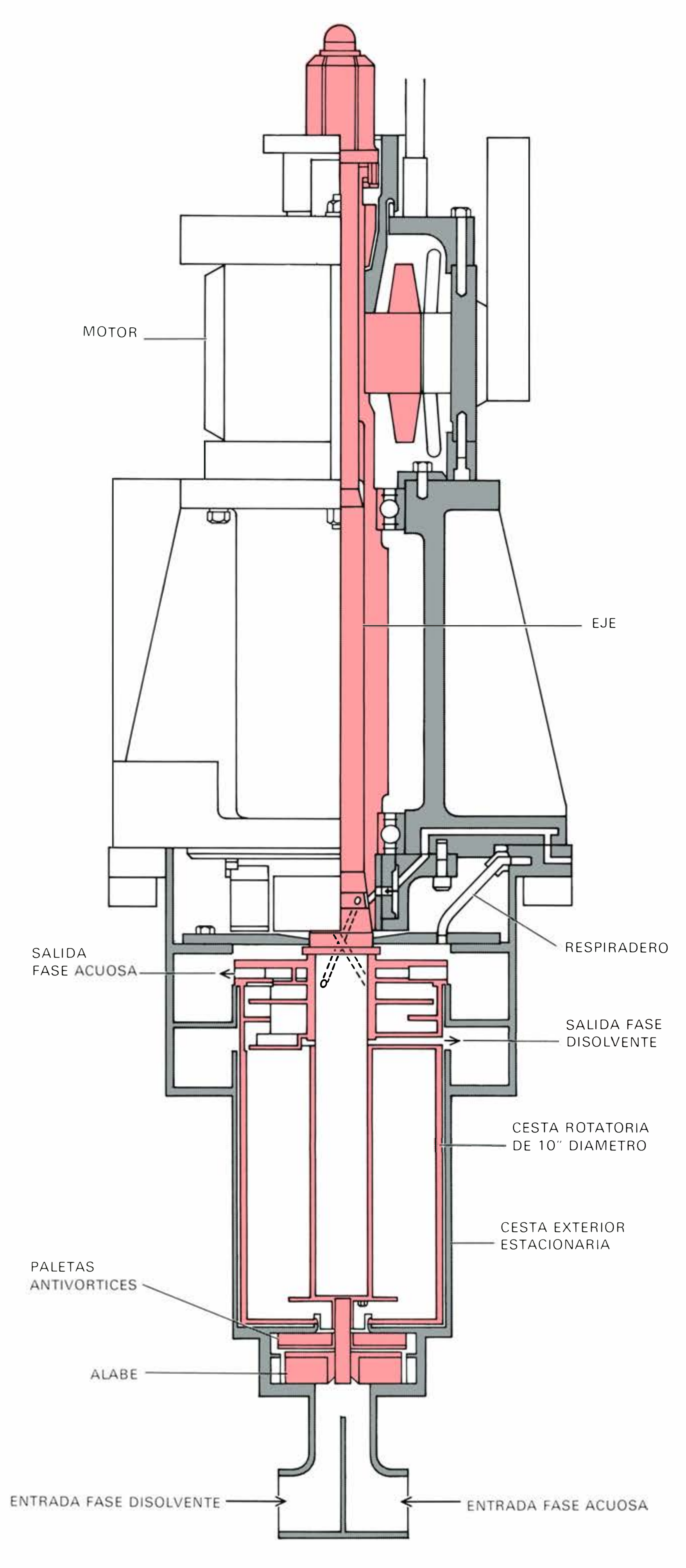


LOS MEZCLADORES-SEDIMENTADORES, en los que el flujo se mantiene más por medio de paletas que por gravedad, se usaron por vez primera en la planta estadounidense de Savannah River. Las soluciones acuosa y orgánica contracirculan por "etapas" horizontales.

samente a través de la columna. La solución orgánica, más ligera, asciende por la columna mientras que la acuosa, más pesada, desciende. En este tipo de columna, la mezcla no es vigorosa y los caudales son bajos. En consecuencia, la columna debe ser muy alta para conseguir una buena separación, lo que da lugar a complicaciones en una planta que tiene que estar fuertemente protegida frente a las radiaciones y en la que se debe evitar el uso de bombas. Cuando se instalaron columnas de relleno en el proceso Butex en Windscale, ocurrió que hubo que construir un edificio de proceso de 20 plantas de altura (con el aparato para disolver el combustible en la parte superior) para que las corrientes radiactivas descendieran por gravedad.

La eficacia de la columna de extracción puede aumentarse mucho y reducirse su altura por "pulsación", de forma que las fases se adelantan y se atrasan a través de platos perforados a medida que pasan por la columna. La pulsación puede hacerse bien por medio de un pistón o introduciendo aire comprimido en una cámara externa. Las columnas con pulsación se instalaron en las plantas Purex en Hanford y en Idaho Falls.

Una alternativa para las columnas de extracción es el "mezclador-sedimentador", en el que las soluciones acuosa y orgánica se mezclan y se separan repetidas veces en series de 12 a 24 etapas horizontales, formada cada una de éstas por



una cámara cuadrada de mezcla en un extremo y por una larga cámara de sedimentación en el otro. El agitador mecánico que mezcla las soluciones hace pasar asimismo el líquido de una etapa a otra.

El mayor inconveniente de los mezcladores-sedimentadores es el gran volumen de uranio y plutonio que está retenido en el líquido. A causa de dicha retención, el disolvente está sometido a un considerable deterioro por parte de la radiación y de la actividad química. Entre las ventajas del sistema está que el contactor puede adaptarse fácilmente a un mantenimiento a distancia, como ocurre en Savannah-River, o bien montarse con control a distancia de los motores que mueven los mezcladores, como ocurre en Windscale. Los mezcladores-sedimentadores se utilizan en la mayoría de las plantas de reprocesado de combustibles nucleares europeas.

El contactor centrífugo desarrollado en Savannah-River constituye una mejora de la columna de extracción y del sedimentador. El compartimiento de sedimentación, causante de la retención de uranio y plutonio, se sustituye por un pequeño separador centrífugo montado sobre el mismo eje de las paletas de mezcla. Típicamente distribuidas en grupos de seis, las unidades centrífugas son más eficaces que el mezclador-sedimentador, tienen un 2 por ciento de su volumen, necesitan sólo una pequeña fracción de tiempo para alcanzar el estado estacionario de operación, o para vaciarse, y causan únicamente una quinta parte, como mucho, de deterioro al disolvente. En el contactor de extracción en la planta Purex de Savannah-River, se substituyó un mezclador-sedimentador de 24 etapas por un contactor centrífugo de 18 etapas. Recientemente, se ha desarrollado un contactor centrífugo de flujo axial y etapas múltiples denominado Robatel, por la compañía francesa Saint-Gobain Techniques Nouvelles. En este ingenio se han distribuido ocho etapas a lo largo del único eje vertical de la centrífuga. Se ha seleccionado el aparato como contactor de extracción para el primer ciclo Purex de la planta Barnwell de la compañía Allied-General Nuclear Services.

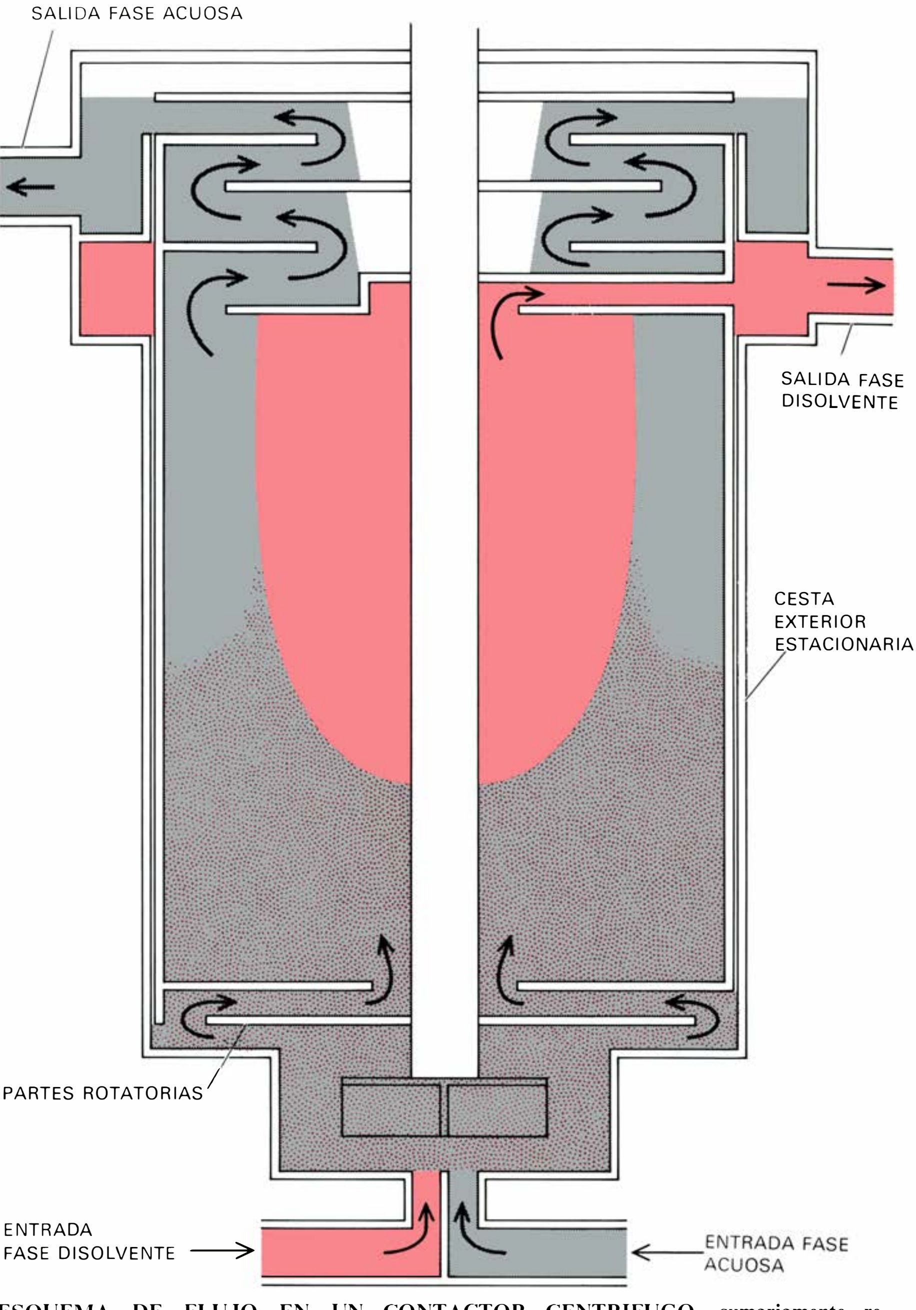
EL CONTACTOR CENTRIFUGO para mezclar y separar la fase disolvente y la fase acuosa se desarrolló en los laboratorios de Savannah River. El papel de la cámara de sedimentación lo realiza una cesta montada sobre el mismo eje que mueve las palas mezcladoras. El motor impulsor, con su armazón y conexiones, es substituible a distancia.

En Gran Bretaña se utilizó la energía nuclear a gran escala para la fabricación de electricidad antes de que se hiciera en Estados Unidos. Para reprocesar el combustible de uranio metálico revestido de una aleación de magnesio procedente de sus primeros reactores nucleares, Gran Bretaña prefirió modificar y expansionar la planta de Windscale, que inicialmente se había construido con vistas a separar plutonio para armamento. La planta se diseñó sobre el principio de que el equipo situado en el interior de las cámaras protegidas, donde se manejara el material más fuertemente radiactivo, no tendría por qué repararse ni substituirse. Este principio de no mantenimiento requirió materiales y equipo de elevadísima calidad. La seguridad se afianzó construyendo dos plantas de separación primaria completas (una habría de servir de repuesto). Además, cada planta tenía de repuesto, a su vez, un aparato de disolución completo, así como un contactor de extracción con disolventes. La planta primaria de repuesto nunca se necesitó como tal, y posteriormente se modificó y aumentó su capacidad. En 1957 empezó a reprocesar combustibles nucleares. Se pudo observar entonces la posibilidad de la descontaminación y modificación de la primera planta; con lo cual resultaba que la planta original modificada era útil al programa de energía nuclear británico hasta 1964.

A principios de los años sesenta, Gran Bretaña diseñó y construyó su segunda planta de reprocesado, basada esta vez en el disolvente Purex en vez del Butex, cuya capacidad de reprocesado oscilaba entre 2000 y 2500 toneladas métricas por año. La nueva planta sigue siendo la mayor de su clase en el mundo. Se persistió en el principio de no mantenimiento. En 1969, se le adicionó una instalación de disolución "corte-lixiviación" como etapa "final de cabeza" (head end) para manejar el combustible de óxido de uranio (revestido de acero inoxidable o de "Zircaloy"), sometido a un "quemado" mucho más largo (exposición en el reactor) que las primitivas barras de uranio metálico y que, por lo tanto, tenían un mayor contenido en productos de fisión. La disolución "corte-lixiviación" viene seguida por un ciclo de extracción con Butex para igualar el contenido en productos de fisión del combustible con óxido con el contenido de uranio metálico que alimenta a la planta principal.

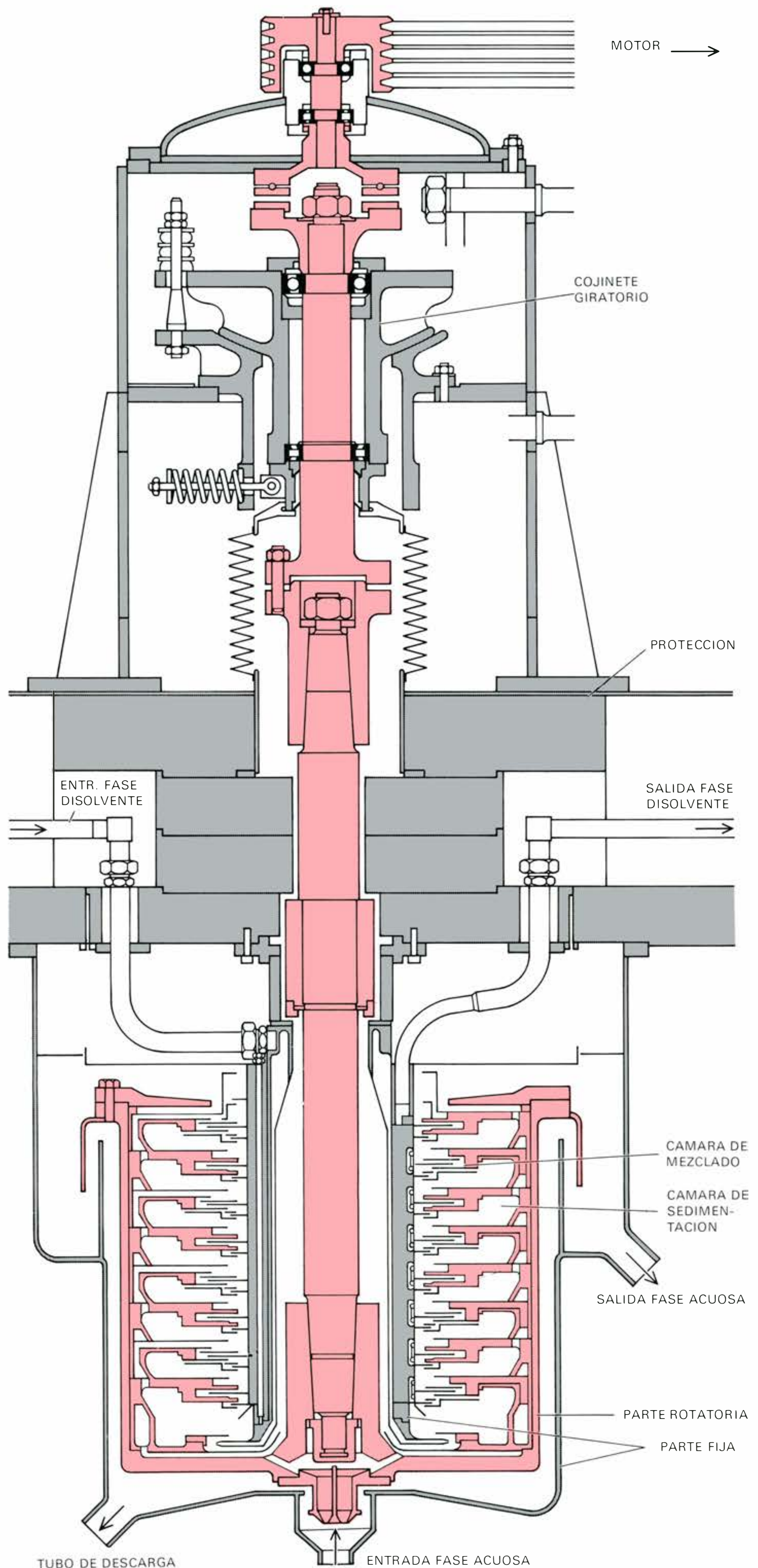
Existe también una pequeña planta de reprocesado en el norte de Escocia, para el combustible gastado en el reactor de Dounreay y en los reactores para ensayos de materiales, con uranio altamente enriquecido. En Dounreay, el ciclo del combustible se completa bajo condiciones que se anticipan a los más estrictos requisitos de las generaciones posteriores de reactores nucleares comerciales. El combustible enriquecido de uranio, que se ha sometido a una exposición elevada en el reactor, se reprocesa después de un corto enfriamiento y se refabrican nuevos elementos de combustible.

Las plantas de reprocesado de Windscale (así como los tratamientos de Dounreay) forman parte actualmente de la British Nuclear Fuels Ltd., corporación autónoma (aunque propiedad del Gobierno) que proporciona servicios completos de tratamiento de combustibles y reprocesa combustibles nucleares gastados de otros países, por ejemplo, de Alemania Occidental, Italia, Japón, España y Suecia. Es miembro de la United Reprocessors GmbH, compañía anglo-francesa-alemana fundada para coordinar las necesidades y operaciones nucleares en Europa.



ESQUEMA DE FLUJO EN UN CONTACTOR CENTRIFUGO, sumariamente representado. Después de realizarse la mezcla, las soluciones acuosa y orgánica ascienden hacia la cesta rotatoria, en donde se separan por centrifugación. La solución acuosa, más pesada, se desplaza hacia fuera de la mencionada cesta; la solución orgánica, más ligera, se impulsa hacia la parte interior. Una serie de deflectores colocados en la parte superior de la cesta rotatoria se encargan de canalizar ambas soluciones hacia conductos distintos.

En Estados Unidos, la Atomic Energy Commission, absorbida ahora en la Energy Research and Development Administration (ERDA), apoyó la energía



nuclear, a través de la investigación y desarrollo en laboratorios nacionales, construyendo reactores para demostración (como el de Shippingport, construido en colaboración con servicios públicos) y almacenó (y en algunos casos reprocesó) combustibles gastados procedentes de dichos reactores. Sin embargo, la AEC no adquirió ni la responsabilidad de fabricar el combustible ni la de reprocesarlo. ERDA continúa con la misma política. Solamente el enriquecimiento del uranio y el almacenamiento final de los residuos altamente radiactivos son responsabilidad del Gobierno.

Entre los suministradores de equipo para energía nuclear se despertó el interés por el reprocesado de combustibles, puesto que necesitaban asegurar la existencia de un ciclo cerrado de combustible a sus clientes; interés que también mostraron las compañías químicas que tenían la facultad y conocimientos tecnológicos necesarios y las compañías del petróleo que esperaban expandir sus operaciones hacia otras fuentes de energía. Surgieron varias iniciativas en el reprocesado de combustible. La primera correspondió a la Nuclear Fuel Service (subsidiaria en principio de W. R. Grace and Co. pero ahora pertenece a la Getty Oil Company y a la Skelly Oil Company), que diseñó y construyó una planta con una capacidad anual para 300 toneladas de combustible gastado, en un lugar perteneciente al estado de Nueva York en Wast Valley, N.Y. Después de seis años de funcionamiento, la planta se cerró en 1972, para realizar una ampliación a 750 toneladas anuales, para la corrección de algunas deficiencias en el proceso, para la mejora de las características de la protección al medio ambiente y para la instalación de tratamientos de residuos radiactivos, necesaria para ajustarse a las nuevas normas regulatorias. La planta utilizaba el proceso Purex en columnas con pulsación. El combustible se preparaba para un procesado por el método "corte-lixiviación", cuyo equipo podía mantenerse o reemplazarse por control a distancia. Los compartimientos del proceso Purex se mantenían de forma directa.

Sin embargo, y de acuerdo con los últimos informes, el cálculo de los costes de las modificaciones presentó un au-

EL CONTACTOR de múltiples etapas, denominado Robatel, debe su desarrollo a la firma francesa Saint-Gobain Techniques Nouvelles. La cesta rotatoria de esta máquina centrífuga posee un diámetro de 80 centímetros, unas tres veces el mismo diámetro de la cesta de la unidad de la Savannah River.

mento de 15 a 600 millones de dólares, por lo que la Nuclear Fuel Services tuvo que retirar, en la Nuclear Regulatory Commission, su solicitud de reapertura.

Mientras tanto, la General Electric Company se había convencido de que podían construirse plantas de reprocesado relativamente pequeñas para servir a un grupo de reactores, dentro de un pequeño radio de acción. La General Electric Company diseñó y construyó una planta de estas características, la Midwest Fuel Recovery Plant, en Morris, Ill., cerca de la central nuclear de Dresden, de la Commonwealth Edison Company. La planta de Morris, con una capacidad de 300 toneladas por año, incorporó las principales características del proceso PTB-Purex clásico, con el objeto de minimizar la sobrecarga de los costes de reprocesado en el coste de la energía nuclear. El proceso Aquafluor de la General Electric comportaba una extracción con disolvente PTB para la separación de uranio y plutonio de la mayoría de los productos de fisión, un intercambio iónico para separarlos y lechos fluidizados para la calcinación de nitrato de uranilo a óxido (UO_3) y para la conversión de óxido a hexafluoruro (UF_6).

En lugar del usual segundo ciclo de extracción del uranio con disolventes, la General Electric incorporó una etapa de separación; ésta se basa en la diferencia de volatilidad entre el UF_6 y los fluoruros de los productos de fisión. Dicha etapa redujo los costes y eliminó alguno de los residuos líquidos, pero supuso el manejo a distancia de polvos radiactivos. Durante la puesta a punto del equipo de la planta con productos no radiactivos, se llegó a la conclusión de que los problemas asociados con el manejo de sólidos finos radiactivos eran mucho más importantes que lo previsto, e impedirían que la planta funcionase adecuadamente. Ahora parece que la planta no puede modificarse a un coste soportable para evitar tales dificultades y ajustarse a las normas actuales de la Nuclear Regulatory Commission.

En 1968, la Allied Chemical Corporation anunció su intención de construir una planta de reprocesado de 1500 toneladas anuales en la zona industrial de Barnwell County, junto a la planta del Gobierno en Savannah River. Allied Chemical se asoció con la General Atomic Company, perteneciente a la Gulf Oil Corporation y a la Royal Dutch/Shell Group of Companies, como copropietarios de la Allied-General Nuclear Services, que es el operador de la instalación de Barnwell. Aparte de su proximidad, la planta de Barnwell es independiente de la de Savannah River. La construcción de la planta de reprocesado en Barnwell se inició en 1971, y las instalaciones planeadas en un principio están ya terminadas. Se hallan preparadas para recibir y almacenar combustible, disolver por "corte-lixiviación", realizar separaciones Purex, almacenar residuos de elevada actividad y nitrato de plutonio y convertir el nitrato de uranilo en hexafluoruro de uranio.

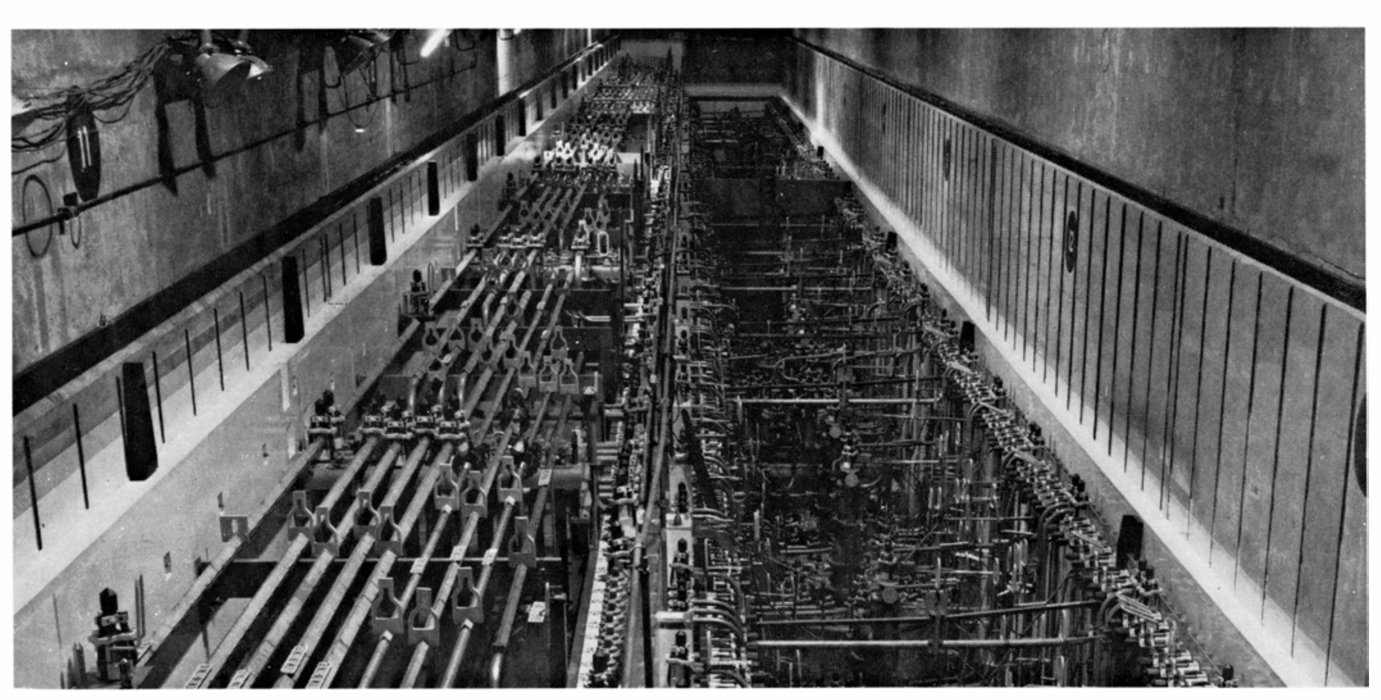
El diseño y construcción en Barnwell de las instalaciones "final de cola" (tail end) para la solidificación de los residuos, para su envío a los depósitos federales y para la conversión del nitrato de plutonio en óxido de plutonio sólido, están pendientes de las decisiones que tomen la Nuclear Regulatory Commission y ERDA sobre los requisitos y destinos de dichos materiales. Hasta ahora, la Allied-General Nuclear Services ha invertido unos 250 millones de dólares en la planta de Barnwell (unas tres veces más que la estimación inicial); las instalaciones para el tratamiento de residuos y de plutonio se espera que costarán otros 250 millones de dólares. Quinientos millones de dólares puede parecer una abultada inversión para una sola planta de reprocesado, pero dentro de la eco-

EL ESQUEMA DE FLUJO EN EL CONTACTOR ROBATEL consta de ocho etapas de mezcla y sedimentación, colocadas una encima de la otra. El diagrama esquematiza la dirección del flujo a través de una etapa. La solución orgánica desciende por el interior de la cesta rotatoria, se mezcla repetidas veces con la solución acuosa, la cual asciende a través de una serie de conductos y deflectores. En cada etapa la solución acuosa sale del sedimentador por los conductos señalados con una *A* y reaparece en la etapa superior en los conductos que están señalados con una *B*.

HANFORD
IDAHO FALLS
WEST VALLEY
MORRIS
AIKEN
BARNWELL

CLAVE
CENTRAL NUCLEAR EN OPERACION
CENTRAL NUCLEAR EN CONSTRUCCION
CENTRAL NUCLEAR EN PROYECTO
PLANTA DE REPROCESADO DE COMBUSTIBLE (FEDERAL)
PLANTA DE REPROCESADO DE COMBUSTIBLE (PRIVADA)
ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS (FEDERAL)

SESENTA Y DOS REACTORES NUCLEARES tienen la autorización para funcionar en Estados Unidos en 44 sitios distintos. Otros 72 se están construyendo y 61 se hallan en fase de proyecto. Las plantas que funcionan tiene una capacidad total de 44.650 megawatios, lo cual representa el 8 por ciento del total de la capacidad de generación de electricidad norteamericana. Los 72 reactores bajo construcción aportarán 75.500 megawatios. Sólo se ha terminado una planta para reprocesar el combustible gastado, y aguarda la autorización para entrar en funcionamiento: es la planta de 500 millones de dólares de la Allied General Nuclear Services en Barnwell. Se han construido otras dos plantas de reprocesado, una por la General Electric Company en Morris, Ill., y la otra por Nuclear Fuel Services, Inc., en West Valley. El Gobierno federal tiene las tres instalaciones mas importantes para reprocesar combustibles: una en Hanford, (actualmente cerrada), otra en Savannah River cerca de Aiken, y la tercera en Idaho Falls. En estos tres sitios, los Estados Unidos tienen también almacenados unos 239 millones de litros de residuos radiactivos, de los combustibles gastados en más de treinta años, destinados a la extracción de plutonio. El combustible de los reactores se almacena en piscinas cercanas a las plantas de energía y de reprocesado, entre ellas las de Morris y West Valley.



EL "DESFILADERO" DE REPROCESADO QUIMICO, de 245 metros de longitud, en la planta gubernamental de Savannah River es una de las dos instalaciones paralelas de mantenimiento a distancia. Todas las tuberías y equipo pueden retirarse y sustituirse por un operador situado en una grúa fuertemente protegida, y que se mueve a lo largo del "desfiladero" sobre raíles visibles en los muros de revestimiento. Los tramos de tuberías están equilibrados para su nivelado y puedan ser izados. Los reactores se diseñaron para producir plutonio y tritio.

nomía global de la energía nuclear, el gasto representa menos del 1,5 por ciento del valor de los 50 a 60 reactores nucleares, cuyo combustible gastado puede reprocesarse en la planta de Barnwell.

En la instalación de separaciones de la Allied-General Nuclear Services, el combustible gastado podrá fragmentarse en pequeños trozos por medio de un ingenio de cizallamiento inventado por sus ingenieros y diseñado y construido por Saint-Gobain Techniques Nouvelles. Las partículas de óxido de uranio se disuelven y separan del revestimiento en una serie de recipientes donde el ácido lixivia los últimos restos de combustible de la carga de cascos que formaban el revestimiento. Las partículas sólidas se eliminan, por centrifugación, de la solución. Existen dos innovaciones en el sistema Purex: el primer contactor de extracción es la unidad centrífuga de Saint-Gobain, descrita anteriormente, y la separación de plutonio se realiza por reducción electrolítica del plutonio en una columna "electropulsada", invento del equipo técnico de la Allied-General Nuclear Services. Los otros contactores son también columnas "pulsadas". El equipo que esté sujeto a cualquier fallo mecánico o eléctrico, o a eventuales condiciones corrosivas, puede reemplazarse desde lejos; el resto del equipo se diseña para un mantenimiento directo del mismo.

Exxon Nuclear es un suministrador de uranio y de otros combustibles para reactores y está interesada en el resto del ciclo del combustible, enriquecimiento y reprocesado incluidos. A principios del año pasado, comunicó sus planes para construir una planta que reprocesara 1500 toneladas anuales en un terreno perteneciente a la ERDA, en Oak Ridge, Tennessee. La compañía ha solicitado el permiso de construcción de la Nuclear Regulatory Commission.

Un directivo industrial ha sintetizado la situación actual en una frase: "En este momento no existe el ciclo del combustible nuclear". Al menos en los Estados Unidos, esto es verdad; incluso el diseño y construcción de plantas nuevas y modificadas están en un punto muerto, pendientes de la resolución de los "impasses" correspondientes a la normalización y a los problemas planteados por el medio ambiente.

El examen del reciclado del plutonio como óxido mezclado con uranio acaba de comenzar; la manipulación de los residuos sigue en el limbo hasta que se decidan las especificaciones y el lugar de almacenamiento final. La propia recepción y el almacenamiento del combustible gastado en Barnwell esperan permiso, que ha de venirles tras un examen que apenas ha empezado. Las instalaciones de separación están preparadas y podrían hacerse funcionar, con un almacenamiento provisional de residuos y plutonio en soluciones, pero esto también espera la finalización de los cálculos y pruebas de seguridad y problemas del medio ambiente, y, tras ellos, la licencia respectiva.

La situación en otros países es sorprendentemente distinta. En Gran Bretaña y Francia confían en las instalaciones de producción militares para procesar el uranio gastado por la primera y segunda generación de reactores nucleares, que utilizaban combustible metálico con preferencia al óxido. La construcción de instalaciones adicionales para reprocesar el combustible de óxido de uranio de los nuevos reactores de agua ligera (a diferencia de los enfriados por gas) quedan rezagadas en el programa, aunque no en demasía. La instalación "final de cabeza" de Windscale para el combustible en forma de óxido funcionó desde 1970 hasta 1973, año en que cerró al producirse una pequeña fuga de radiactividad, lo que condujo a una lógica revisión del reprocesado de los combustibles óxidos fuertemente radiantes. Gran Bretaña ha decidido no modificar ni reconstruir la instalación "final de cabeza"; entre sus proyectos actuales está montar dos nuevas plantas para reprocesar óxido con una capacidad de 1500 toneladas métricas anuales cada una, que habrían de estar terminadas a lo largo de la próxima década.

La primera planta de reprocesado francesa en Marcoule, con una capacidad de tratamiento de 1000 toneladas de uranio metálico por año, viene funcionando desde 1958. Una segunda planta, con la misma capacidad, se puso en marcha en La Hague en 1967. A dicha planta se le ha añadido recientemente una instalación "final de cabeza", con capacidad para manipular 800 toneladas de combustible óxido por año. Francia proyecta la construcción de dos instalaciones adicionales completas para el procesado de óxido, dotada cada una con una capacidad de 800 toneladas anuales; la primera estará lista en 1984 y la segunda en 1986.

En Alemania Federal, un grupo de cuatro compañías de ingeniería química y nuclear, que ha estado operando una pequeña planta para pruebas, se encuentra en la fase de búsqueda de lugar para una planta de 1500 toneladas anuales de capacidad, que se espera entre en funcionamiento a finales de la década de los ochenta. El programa global de las instalaciones de reprocesado europeas está dirigido, desde 1971, por United Reprocessor, un consorcio de empresas de Gran Bretaña, Francia y Alemania Federal. Su objetivo es conseguir una capacidad de reprocesado integrado de unas 20.000 toneladas anuales, en los primeros años de la próxima década. Existen pequeñas plantas de prueba en Japón y la India. Brasil y Pakistán han negociado recientemente con Alemania Federal y Francia, respectivamente, para la adquisición de plantas a escala industrial. Japón ha avanzado asimismo proyectos para la construcción de una gran planta.

¿Cómo puede la industria nuclear estadounidense seguir trabajando sin el reprocesado de sus combustibles gastados? Por el momento se puede producir suficiente uranio enriquecido para abastecer totalmente a los reactores nucleares existentes, debido en parte a que su expansión se ha visto retardada a resultas de la crisis económica, elevados costes de construcción y retrasos en las autorizaciones. El volumen de combustible nuclear gastado, que se acumula anualmente, todavía puede manipularse. Durante este año se producirán unas 1100 toneladas, cuyo almacenaje para un largo período de tiempo es simple y seguro. El revestimiendo de elevada integridad y resistencia a la corrosión es más que adecuado para contener el combustible en el agua de extrema pureza de las piscinas de almacenamiento. Sin embargo, se está exigiendo demasiado de la capacidad de las mismas y se están realizando modificaciones para aumentar el tamaño de alguna de ellas. Está en servicio la piscina de almacenamiento de Morris y se está terminando otra en Barnwell.

El bajo grado de aprovechamiento del combustible en los reactores nucleares actuales y la creciente inversión en el inventario de combustibles gastados aumenta sustancialmente el coste de la energía eléctrica de las centrales nucleares, incluso hasta un 20 por ciento. Estos costes deben ser cubiertos, en última instancia, por el consumidor. Y lo que es más importante, el combustible gastado constituye una poderosa fuente de energía que, al final, tendrá que "explotarse". El ciclo de combustible necesita cerrarse de modo que las tecnologías de la fabricación de combustibles y del reprocesado puedan estar a la par con la tecnología del reactor y puedan satisfacer sus necesidades mutuas. Conviene, en particular, que los reprocesadores comerciales dispongan de plantillas experimentadas y procesos comprobados,

antes de que tengan que asumir la tarea más difícil de reprocesar combustibles de plutonio de los reactores más modernos y de otros sistemas avanzados, con elevadas velocidades de "quemado" y, quizás, con períodos de enfriamiento más lentos.

Estados Unidos cuenta con más de tres décadas de experiencia completamente satisfactoria en el reprocesado de combustibles de los que se han extraído centenares de toneladas de plutonio, sin ninguna prueba de que estas actividades hayan causado daño alguno al hombre o a su medio ambiente. A pesar de esta experiencia, los adversarios de la energía nuclear señalan peligros tales como posibles escapes de los tanques que almacenan líquidos que contienen residuos altamente radiactivos, la larga vida de estos residuos bajo cualquier procedimiento de almacenaje y el daño que podría producirse por la descarga rutinaria de efluentes con niveles muy bajos de radiactividad, por accidentes ocurridos en la planta de reprocesado o, en fin, por el hurto de plutonio con fines terroristas. No es posible responder en este artículo a todos los interrogantes esgrimidos, pero pueden discutirse algunos hechos conocidos.

Después de un tiempo, los principales productos de fisión que hay en los residuos altamente radiactivos son el cesio 137 y el estroncio 90. Estos residuos contienen también trazas de plutonio y uranio. El cesio 137 y el estroncio 90 tienen vidas medias de aproximadamente 30 años, de modo que se necesitan varias centurias de almacenaje para que se desintegren a niveles despreciables. (Veinte períodos de vida media, o bien un factor de un millón, son suficientes para hacer inocuas la mayoría de las soluciones residuales.) Aunque la vida media del plutonio es de 24.000 años, como es un producto valioso, su contenido en los residuos se mantiene tan bajo como es posible. Los residuos típicos contienen menos del 0,1 por ciento de plutonio. Actualmente todos los residuos altamente radiactivos se encuentran como soluciones, lodos y masas de sales inorgánicas en tanques subterráneos; no se ha enviado ninguno a su almacenamiento definitivo. Los tanques están controlados, y los residuos pueden transferirse (y lo han sido) a nuevos tanques en caso necesario.

Se han registrado escapes en algunos de los viejos tanques de Hanford y Savannah-River, pero, como podía suponerse, dadas las características de los residuos y del terreno, el desplazamiento de los residuos lejos de las fuentes de fuga fue muy pequeño. El estroncio y el plutonio son muy insolubles en las condiciones químicas de los tanques, y el cesio se absorbe fuertemente en los minerales arcillosos del suelo. A medida que se han ido construyendo grupos sucesivos de tanques, se han ido elevando las especificaciones de construcción y mejorando la integridad de almacenamiento.

Los residuos alcalinos de Hanford y Savannah-River contienen grandes concentraciones de sales de aluminio, hierro y sodio, alcanzando así un volumen importante (actualmente se acerca a los 289 millones de litros). Por otro lado, sólo unos 250 litros de residuo ácido, concentrado y altamente radiactivo quedan del reprocesado de una tonelada de combustible. Esta cantidad puede reducirse, siguiendo procesos comprobados, hasta 75 litros de sólido vítreo. La política actual del gobierno norteamericano es que los residuos se conviertan en sólidos por los reprocesadores, dentro de los 10 años siguientes a su producción, y luego se envíen a silos federales para un almacenamiento prolongado. La forma que han de adoptar los residuos y su almacenamiento final son problemas técnicos que requieren ya una toma de decisión y un desarrollo más que una investigación propiamente dicha. Los lugares serán, casi con seguridad, formaciones geológicas; al parecer, los más idóneos serían lechos de sales naturales y otras formaciones rocosas cristalinas o sedimentarias. Sin embargo, el empleo de los yacimientos salinos y de las formaciones geológicas en general fue duramente criticado por la opinión pública, al señalarse, como primer lugar para los almacenamientos reales provisionales, una mina de sal abandonada en Kansas, anteriormente destinada ya a las pruebas de almacenamiento. Se puso de manifiesto que la vieja mina no estaba suficientemente aislada de la zona de extracción de sal cercana. Se abandonó el proyecto.

Los efluentes gaseosos y acuosos de las plantas de reprocesado arrastran al medio ambiente productos de fisión, como el kriptón 85 y el tritio, así como ciertos subproductos secundarios, por ejemplo, el carbono 14. Si bien el total de curies de radiación emitidos por estas sustancias es elevado, de sus propiedades radiactivas, físicas y químicas y sus características biológicas se deduce que la dosis de radiación que alcanza al hombre constituye una pequeña fracción de la que recibe inexorablemente del medio ambiente. Algunos grupos sociales objetan, a propósito de estas eliminaciones rutinarias, que cualquier aumento en la dosis total de radiación resulta peligroso, por pequeño que sea. Esta es la "hipótesis lineal", basada en la extrapolación lineal de los efectos que pueden observarse a elevadas dosis a otros que no pueden observarse a bajas dosis.

La radiactividad natural expone a cada habitante de la tierra a una dosis media anual de radiación de 100 milirems. (A título de pura ilustración comparativa, el límite oficial de la cantidad de radiación a que puede exponerse un trabajador en una planta nuclear en el curso de un año es de cinco rems, o sea 50 veces superior.) La cantidad de radiación adicional debida a las operaciones nucleares es sólo de unos pocos milirems en las localidades más afectadas cerca de las plantas nucleares. Estos pequeños incrementos pueden reducirse, pero solamente con elevadas inversiones y, en algunos casos, sustituyéndolos por otros peligros. (Un ejemplo de ello es el almacenaje de grandes cantidades de kriptón-85 gaseoso, a elevada presión.)

Hay que aducir dos principios generales establecidos por el Commitee on the Biological Effects of Ionizing Radiations of the National Academy of Sciences. Dice el primero: "No debería permitirse ninguna exposición a la radiación ionizante sin la esperanza de un beneficio proporcionado" El segundo: "El público debe de estar protegido de la radiación, pero no hasta el extremo de que el grado de protección proporcionado implique la aparición de un peligro peor que la radiación que se quiere evitar. No debería intentarse la reducción de los pequeños riesgos a costa de grandes sumas de dinero, que, gastadas de otra suerte, producirían beneficios superiores".

Los temores de accidente en las plantas de reprocesado carecen de fundamento. El minucioso control requerido para mantener la eficacia del proceso minimiza la probabilidad de un accidente. Además, la estrecha vigilancia preventiva y las zonas selladas, necesarias para la protección de la radiación, confinan cualquier escape accidental a un área pequeña. La posibilidad de que una masa crítica de un isótopo fisionable pueda acumularse es una preocupación razonable en una industria que se desarrolló a partir de la bomba atómica. Sin embargo, el primer efecto de una acumulación accidental de una masa crítica es la casi dispersión instantánea del material, que inmediatamente frena la reacción en cadena. La máxima energía liberada es pequeña (equivalente a la que corresponde a la combustión de cinco litros y medio de gasolina), de modo que se produciría un daño leve en las instalaciones

y una dispersión de radiactividad mínima. Sin embargo, la emisión de radiación es importante; un trabajador que estuviera en las proximidades recibiría una grave dosis de radiación. En los treinta años de funcionamiento que llevan las instalaciones del Gobierno estadounidense se han producido doce acumulaciones de masa crítica, cinco de las cuales tuvieron lugar en las plantas o laboratorios de procesado químico. Se produjo una muerte, pero durante el mismo período de tiempo también hubo un ahogado y un asesinato en las mismas instalaciones. Las explosiones químicas y los incendios han acarreado consecuencias mucho más serias en las plantas nucleares, pero éstas tampoco alcanzaron valores significativos.

Para muchos, el mayor potencial de desastre reside en la hipótesis de que grupos terroristas obtuvieran plutonio y fabricaran una bomba atómica. Ahora bien, hay graves impedimentos que entorpecen dicho propósito. Hasta una bomba de moderada potencia requiere una capacidad tecnológica considerable; además, resulta más difícil fabricar una bomba con el plutonio de los reactores que con el plutonio producido específicamente para armamento nuclear.

No se tiene presente que, durante la exposición larga del combustible en un reactor nuclear, se produce una acumulación de isótopos diferentes de plutonio 239, particularmente plutonio 240, que dificultan sobremanera la consecución de una masa supercrítica de plutonio sin que se produzca una explosión prematura ineficaz. El plutonio para armamento se fabrica en el reactor con tiempos de exposición más cortos. Por otra parte, la radiación emitida por el plutonio se detecta facilmente con instrumentos sensibles. (Estos instrumentos pueden detectar 0,25 gramos en un volumen de residuos de materiales radiactivos de varios metros cúbicos.)

La dilución del óxido de plutonio con óxido de uranio antes de que abandone las plantas de reprocesado, o su desnaturalización con un material más radiactivo, son posibles frenos al secuestro de los envíos. Sin embargo, tales estratagemas resultan ingenuas si se considera que existen millares de armas dotadas de plutonio dispersas por el mundo y más todavía en las plantas que las fabrican. Nuestra más firme esperanza es que, algún día, el plutonio resulte más valioso como combustible para los reactores nucleares que como material para armamento; entonces, tal vez, las naciones convertirán sus bombas en barras de combustible.

Postefectos negativos en la percepción visual

Podremos ver uno de ellos si miramos fijamente una cascada de agua durante un corto período de tiempo y luego apartamos la vista de ella; nos parecerá que el panorama circundante se va moviendo lentamente hacia arriba

Olga Eizner Favreau y Michael C. Corballis

Constituye una experiencia corriente mirar una luz intensa y encontrarse con que, durante algún tiempo después, permanece una imagen oscura del objeto en el campo visual. Este fenómeno se llama postimagen negativa (negativa porque el objeto era claro y la imagen es oscura). Se puede experimentar un fenómeno similar cuando se mira fijamente, durante varios minutos, alguna cosa que se esté moviendo en una dirección uniforme, una cascada por ejemplo, y luego se aparta la vista de ella; parece entonces que el panorama entorno se mueve en la dirección contraria. A esto se llama postefecto negativo. Las postimágenes y los postefectos son ilusiones; y sirven para traernos a la memoria que los sentidos son mediadores imperfectos entre el mundo externo y la percepción del mismo por parte del individuo. El estudio de dichas funciones tiene valor en psicología pues ofrecen claves para comprender el modo cómo los órganos de los sentidos y el sistema nervioso operan en el procesamiento de la información.

Las postimágenes y los postefectos se hallan en múltiples formas. Por ejemplo, las postimágenes de objetos coloreados aparecen figurados con los colores complementarios a los de los objetos. Si miramos fijamente una mancha de color verde, durante un minuto aproximadamente, y luego desviamos la vista hacia un fondo blanco, podemos esperar ver una mancha rojiza que tenga la misma forma *(véase la ilustración de la página opuesta)*.

Además de los postefectos cinéticos, como los que pueden asimilarse al provocado en la observación fija de una cascada, cabe experimentar otros postefectos figurales. Por ejemplo, si miramos una línea que está inclinada unos 15 grados respecto a la vertical, otra línea que sea realmente vertical nos parecerá inclinada en la dirección opuesta *(véase la ilustración inferior de la página 23)*. Puede observarse un postefecto relacionado con el anterior al mirar, por un cierto tiempo, una línea curva; si nos fijamos después en una línea recta, ésta nos parecerá curvada hacia el lado opuesto.

Los postefectos no se restringen en absoluto a la visión. Si se le vendan los ojos a una persona y se le hace mover el dedo, varias veces y de un extremo a otro, a lo largo de una varilla curva, al sustituírsela por otra varilla recta, ésta le parecerá curvada en el sentido contrario. Del mismo modo, como demostrara Stuart M. Anstis, de la Universidad de York, si se escucha reiteradamente un tono de intensidad creciente, es probable que un tono de intensidad constante suene como si presentara intensidad decreciente. Aquí nos centraremos en los postefectos visuales, ya que son los analizados con mayor dedicación.

Algunos investigadores del siglo XIX llegaron a pensar que los postefectos cinéticos podrían estar relacionados con movimientos de los ojos. La exposición de este sentido a formas en movimiento determina que los ojos sigan el movimiento de tales formas. Si los ojos tienden a mantener la misma pauta de exploración cuando ya no se da movimiento, cualquier forma estacionaria parecerá estar moviéndose en la dirección opuesta.

Tal hipótesis perdió su vigor, en 1850, a raíz de los trabajos realizados con espirales rotatorias por el físico belga Joseph Plateau. Este tipo de espiral parece expanderse o contraerse, según la dirección de rotación. Plateau observó que si uno mira una espiral abriéndose, durante diez minutos, luego, otra espiral que esté inmóvil le parecerá que se va contrayendo; al revés, una espiral que se contrae provoca un postefecto de expansión. El postefecto de la espiral no puede explicarse sencillamente en términos de movimientos oculares, porque tanto la expansión como la contracción consisten en movimientos simultáneos en todas las direcciones.

Para explicar los postefectos se recurre también al concepto de normalización propuesto por J. J. Gibson, de la Universidad de Cornell. Defendió la idea de que una exposición prolongada a un estímulo que se desvía de alguna manera de la norma establecida, puede servir para volver a definir la norma. Por ejemplo, una exposición a una línea que esté ligeramente inclinada respecto a la vertical puede hacer que el observador reajuste su concepción de la vertical a la orientación de la línea. Más tarde, una línea realmente vertical se verá inclinada en la otra dirección. Esta hipótesis puede ser correcta en parte, pero difícilmente podría explicar los postefectos que se presentan cuando no está implicada ninguna norma evidente. Según han demostrado Donald E. Mitchell y Darwin W. Muir, de la Universidad de Dalhousie, el postefecto producido con un estímulo de líneas oblicuas es similar, tanto por su magnitud como por su dirección, a los postefectos producidos con líneas verticales y horizontales.

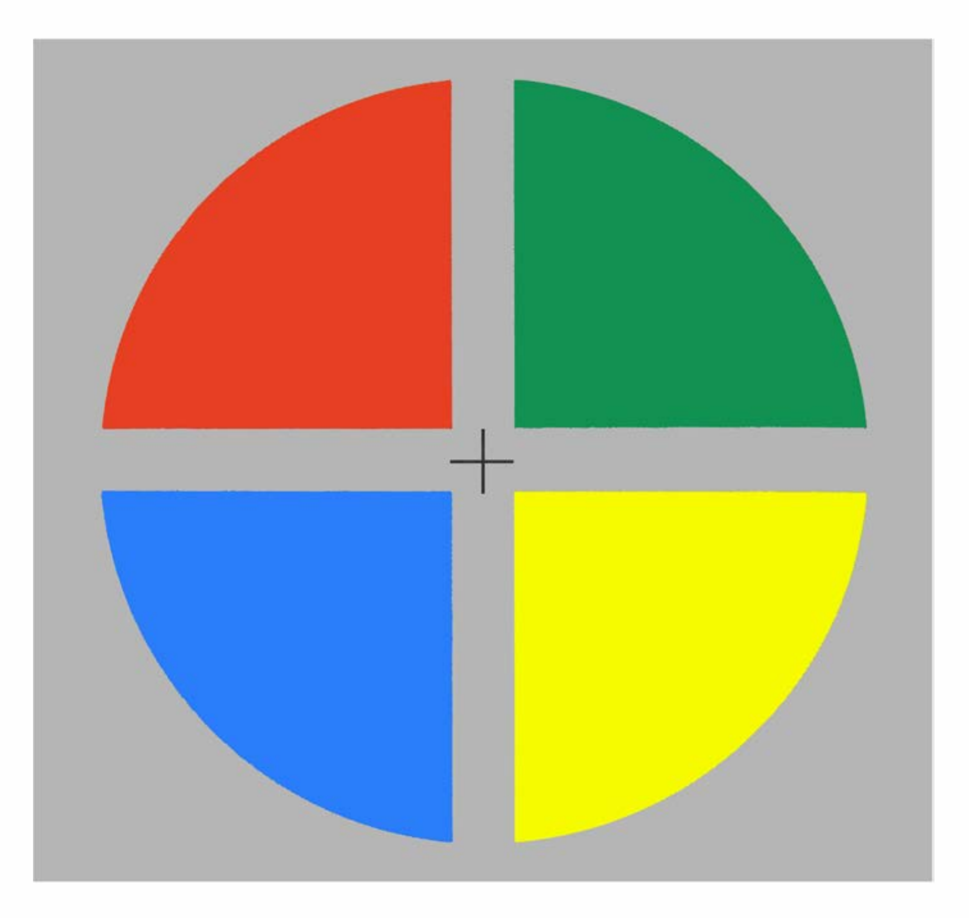
En los últimos años, los esfuerzos para entender los postefectos visuales se han venido basando, cada vez más, en los conceptos derivados de un mayor y más

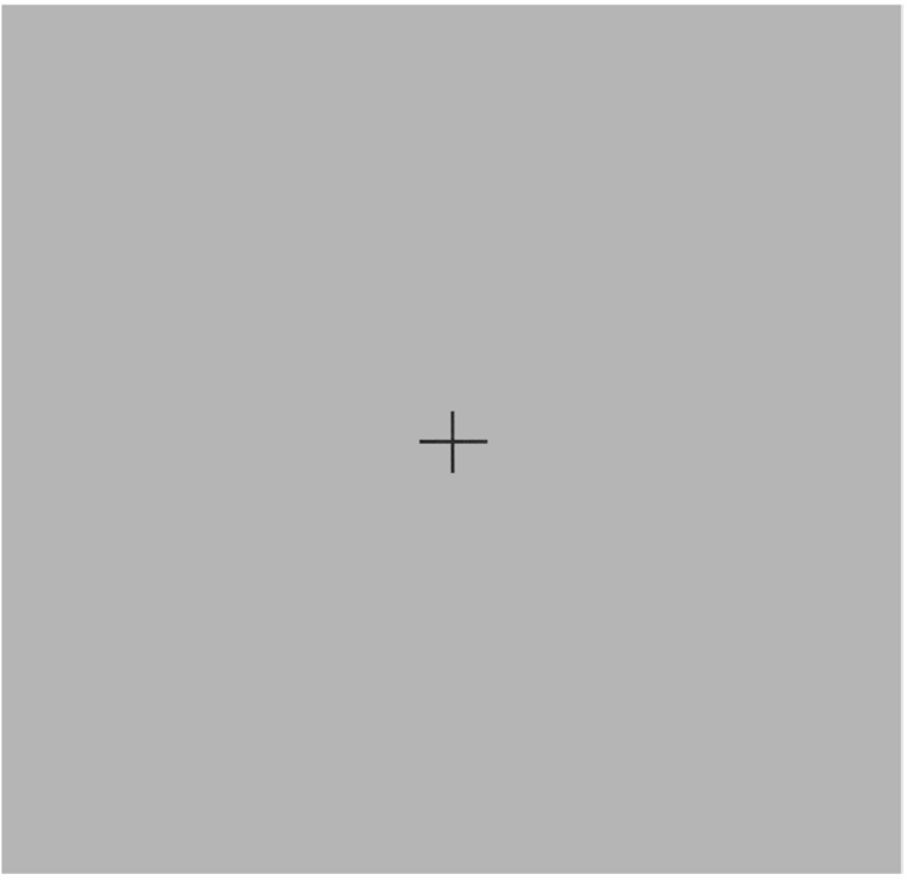
amplio conocimiento de la neurofisiología del sistema visual. Aunque casi todos los trabajos se apoyan en registros obtenidos con microelectrodos en neuronas individuales, (células nerviosas) del sistema visual de animales tales como gatos y monos, algunos psicólogos no han tardado en extrapolar los hallazgos a la visión humana. El intercambio también se ha dado en el sentido inverso: algunos conceptos derivados de los trabajos sobre los postefectos en los seres humanos dieron paso a descubrimientos fundamentales en la neurofisiología de la visión de otros primates. Esperamos poder transmitir lo más conspicuo de este intercambio interdisciplinario.

El cristalino enfoca la luz que llega al ojo para formar una imagen bidimensional en la retina. En ésta, los receptores fotosensibles transforman la imagen en un perfil espacial de impulsos nerviosos. Desde el receptor, los impulsos se transmiten a una capa de neuronas llamadas células bipolares y posteriormente a otra capa llamada de células ganglionares retinianas. Las fibras de las células ganglionares retinianas forman el nervio óptico, que transmite la información nerviosa desde la retina hasta el cerebro.

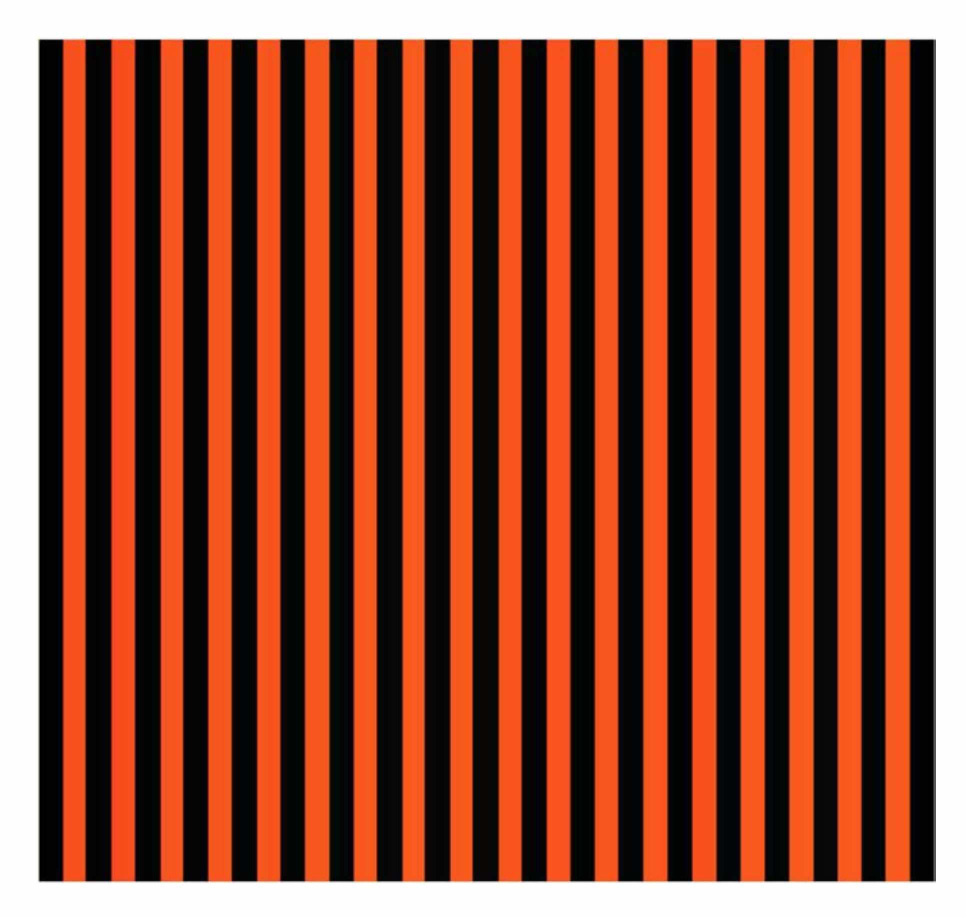
Es probable que las postimágenes negativas y complementarias dependan principalmente de las propiedades de las células retinianas. Resulta fácil demostrar que una postimagen se desplaza al mover uno los ojos y que su localización está perfectamente correlacionada con la posición de éstos; todo ocurre como si la postimagen estuviera pintada en la retina. En cambio, los objetos que realmente están presentes en el campo visual, si uno mueve los ojos, quedan estáticos. Estas observaciones se refieren sólo a movimientos oculares normales y voluntarios. La situación se invierte si se desplaza un ojo de forma pasiva, como, por ejemplo, presionando con el dedo un extremo del ojo; entonces, los objetos del mundo real parecen moverse mientras que la postimagen se mantiene fija. Ambos tipos de observaciones demuestran que las postimágenes se forman a un nivel del proceso que es anterior al nivel en que la localización –percibida– de los objetos en el espacio es "corregida" para eliminar el efecto de los movimientos oculares voluntarios.

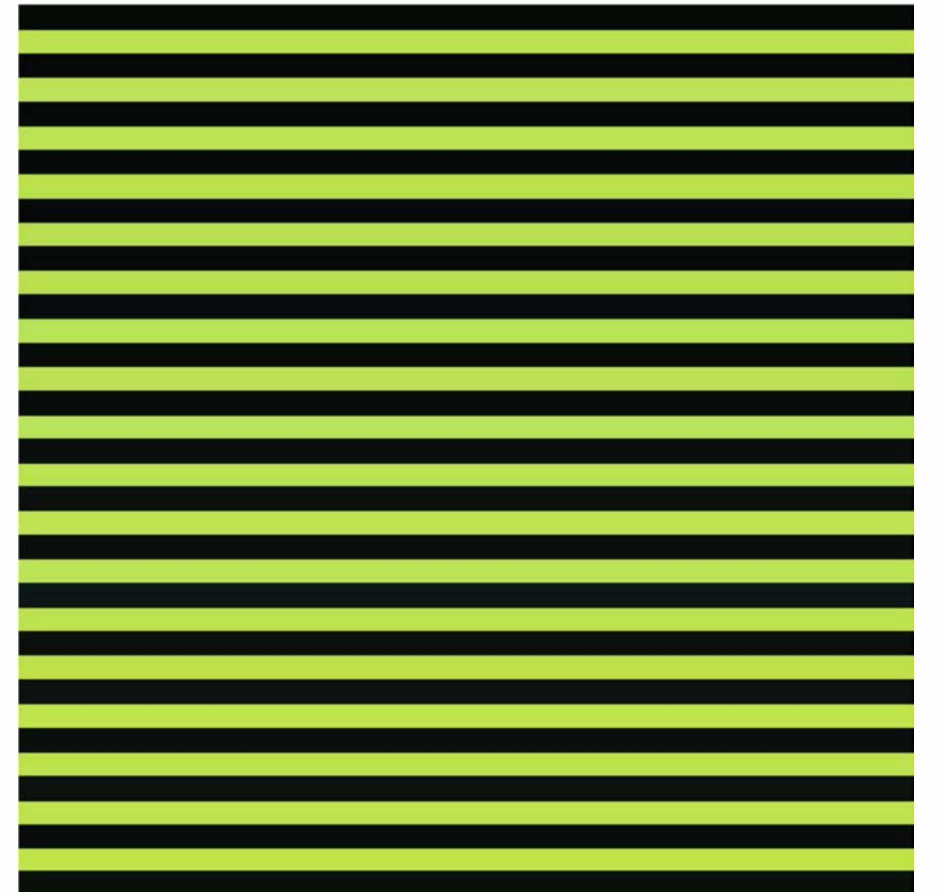
También es fácil demostrar que las postimágenes no se transfieren de un ojo a otro. El lector puede comprobarlo mirando la ilustración de la derecha durante 40 segundos aproximadamente, tapándose un ojo con la mano. La post-





LA POSTIMAGEN NEGATIVA es el tipo más sencillo de postefecto negativo. Aquí la postimagen aparecerá en el color complementario al color que se mira. Si se fija la vista, durante un minuto aproximadamente, sobre la cruz que está en el centro de los colores y luego se mira el fondo gris del grabado inferior, se deberían ver manchas cuyos colores fueran complementarios a los originales.





EL POSTEFECTO DEPENDIENTE queda demostrado por estos dos enrejados y por la figura patrón de la ilustración que está en la página opuesta. Mírese, alternativamente, un enrejado y luego el otro, durante 10 segundos cada uno, por un tiempo total de 10 minutos. Luego, atiéndase a la figura patrón de la página opuesta. Sus líneas horizontales deberían parecer rojizas y las verticales verdosas. Girando la página en un ángulo de 90º, las relaciones se invierten.

imagen se verá posteriormente al mirar cualquier superficie de color liso, pero sólo se verá con el ojo que contempló la ilustración.

Estos fenómenos pueden explicarse suponiendo que las células de la retina, receptores incluidos, alcancen temporalmente, después de una larga estimulación, cierto estado de fatiga o adaptación. Según este razonamiento, si se mira, verbigracia, una mancha blanca, las células que responden a la luz blanca pierden en parte su capacidad de respuesta, resultando, pues, una impresión de una mancha negra si se desvía la vista hacia un fondo uniforme. Las postimágenes complementarias (por ejemplo, cuando el rojo sigue al verde) se pueden explicar de una forma similar.

Las neuronas situadas más allá de los receptores pueden también contribuir a la formación de postimágenes. Estas neuronas comprenden las células bipolares y las células ganglionares de la retina y, posiblemente también, células del cuerpo geniculado externo; éste es una estación de relevo, situada en el cerebro, que recibe los impulsos de las células ganglionares retinianas. Entre las células ganglionares retinianas y las células del cuerpo geniculado externo se hallan células que presentan de forma típica lo que se denomina organización de "proceso opuesto"; ello significa que una célula aumenta su frecuencia normal de producción de impulsos en respuesta a un color, pero disminuye su producción en respuesta al color complementario. Las células de proceso opuesto podrían contribuir a la formación de postimágenes de dos maneras. Supongamos que se mira un fondo verde uniforme durante un período de tiempo. Las células que, ante al verde, producen impulsos a mayor frecuencia (se llaman células "para" para el verde, "contra" para el rojo) podrían llegar a fatigarse, de suerte que, si se mira seguidamente un fondo blanco uniforme, la reducida producción de impulsos se interpretaría como correspondiente al color rojo. Al contrario, las células "para" para el rojo, "contra" para el verde, se hallarían en estado de depresión al mirar uno un fondo verde y podrían "rebotar" seguidamente para intensificar la impresión de color rojo.

Mientras que la postimagen depende de la fatiga de las células situadas en los primeros estadios del proceso visual, los postefectos figurales y cinéticos parecen depender de propiedades de neuronas que se hallan a un nivel superior, quizá en la corteza visual. El

estudio de dichos postefectos recibió un gran impulso merced a los descubrimientos pioneros de David H. Hubel y T. N. Wiesel, de la Harvard Medical School, en torno a las propiedades de las neuronas de la corteza visual del cerebro del gato. Hubel y Wiesel encontraron células que clasificaron, de forma jerárquica, en simples, complejas e hipercomplejas.

Las células simples se estimulan en presencia de contornos, hendiduras o líneas. El contorno, la hendidura o la línea deben tener una localización y una orientación precisas en el campo visual para poder provocar en una célula dada la producción de impulsos a una frecuencia máxima. Aunque la localización no es de una importancia tan crítica en el caso de las células complejas e hipercomplejas, éstas poseen una característica adicional: dan respuesta máxima cuando el estímulo específico se mueve en dirección perpendicular a su orientación. Muchas de estas células son selectivas también para la dirección, en el sentido de que dan respuesta al movimiento en una dirección pero no al movimiento en dirección opuesta.

En 1961, a los dos años del primer informe de Hubel y Wiesel, N. Stuart Sutherland, que ahora está en la Universidad de Sussex, sugirió que las células corticales del tipo descrito por los investigadores de Harvard podrían servir de base para los postefectos cinéticos y de orientación. Su explicación, como la que hemos dado para las postimágenes, parte del concepto de fatiga de las neuronas. Según Sutherland, la percepción de la orientación de una línea implicaría algún tipo de operación promediadora de la actividad de todos los detectores de líneas que dan una respuesta ante la línea. Si se mira, verbigracia, una línea vertical, las neuronas más sensibles a la verticalidad son las que están más activas, y no existen interferencias causadas por la actividad de células sensibles a otras orientaciones. La decisión sobre la orientación de la línea corresponde, pues, a la realidad.

Supongamos ahora que el observador contempla, durante algún tiempo, una línea que está inclinada 15 grados en el sentido de las agujas del reloj. Los detectores de líneas que poseen máxima sensibilidad para la línea de 15 grados alcanzan cierto estado de fatiga, de modo que, cuando el observador pasa a fijarse en la línea vertical, el equilibrio de actividad se desplaza en sentido contrario a las agujas del reloj, alejándose de la vertical. Un proceso similar podría justificar los postefectos cinéticos.

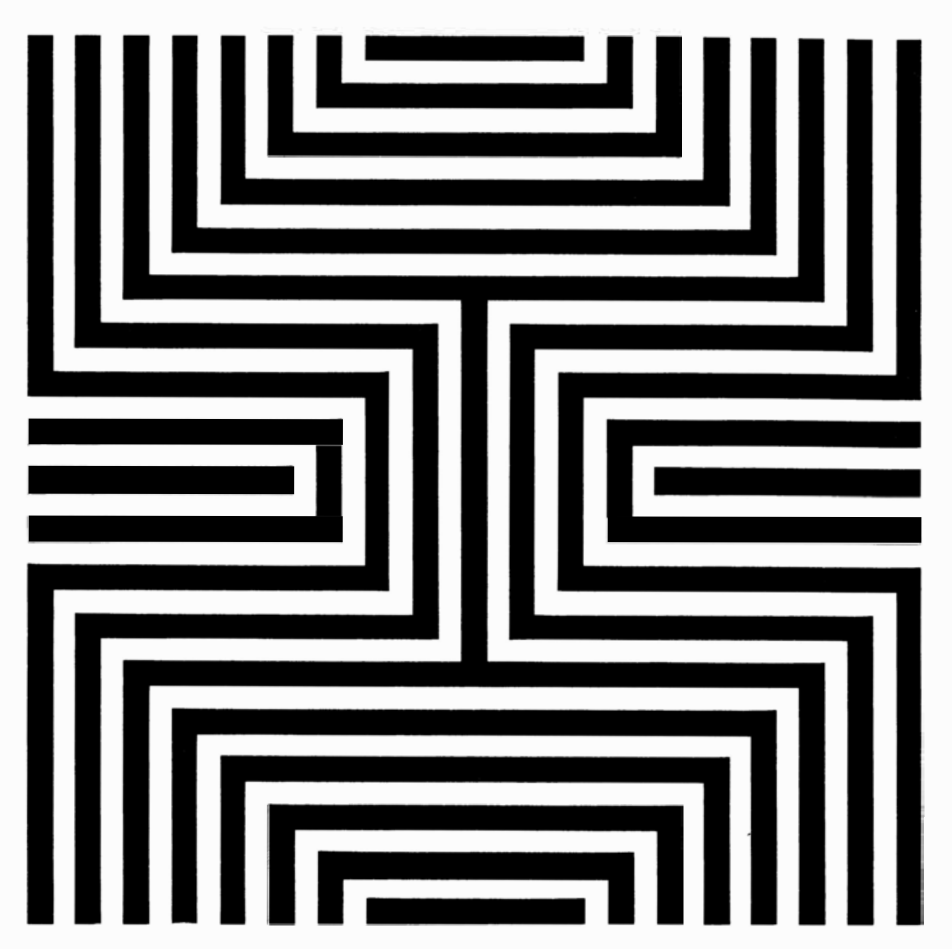


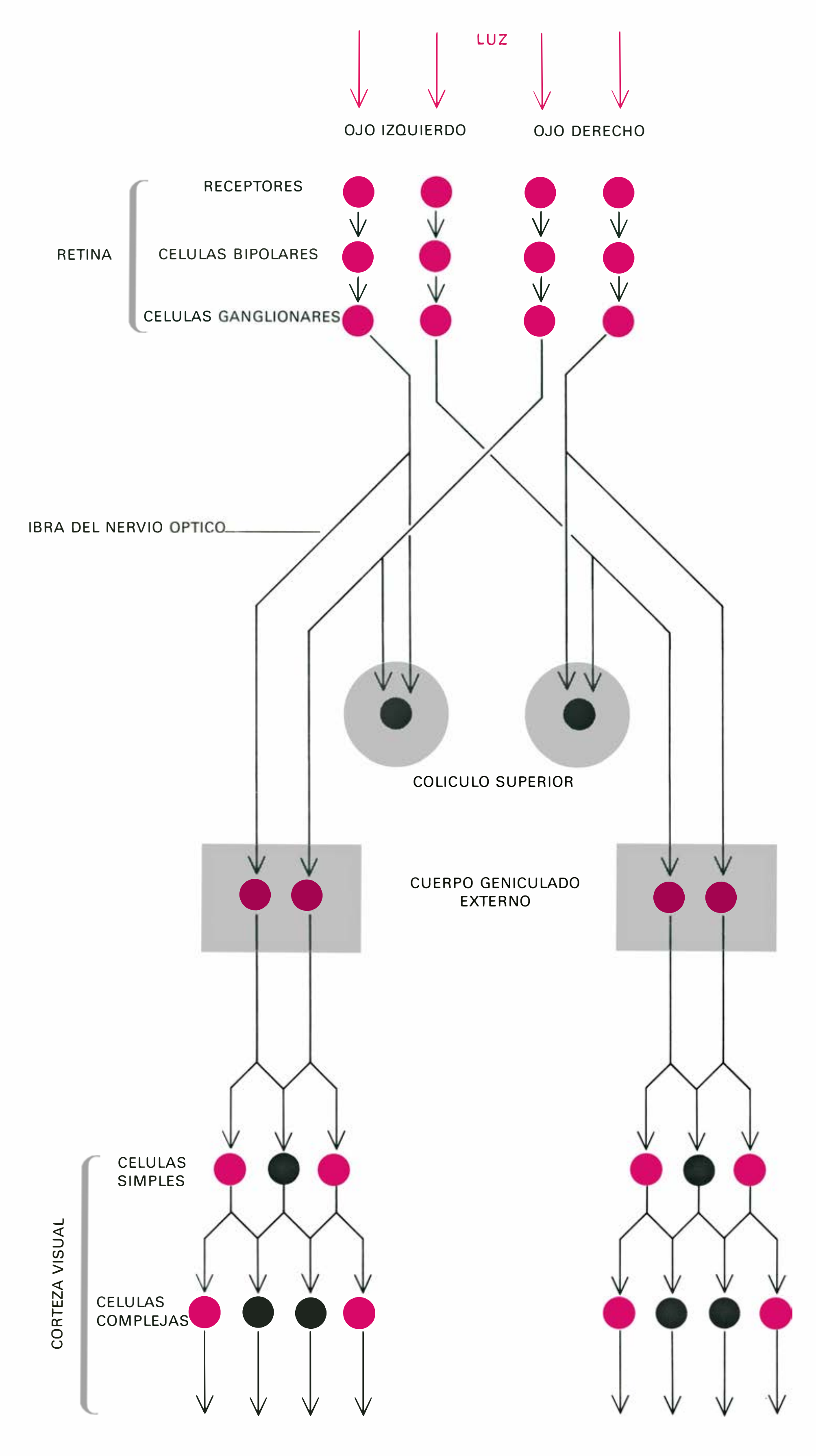
FIGURA PATRON BLANCA Y NEGRA que, cuando se mira en unión con los enrejados de la página anterior, produce un postefecto de color dependiente de la orientación. Estos postefectos de componentes múltiples se llaman efectos McCollough, en honor de su descubridor.

El descubrimiento de que algunas células del cerebro del gato son sensibles, a la vez, a más de un rasgo de los estímulos ambientales, tales como la orientación y el brillo, introdujo la posibilidad de descubrir postefectos de componentes múltiples. Celeste McCollough, del Oberlin College, comprobó por primera vez dicha posibilidad. Pensó que los seres humanos tenían probablemente detectores de líneas similares a los que se encontraron en gatos y que, dado que las personas también poseen visión del color (cosa que no ocurre en los gatos), quizá no fuera descabellado suponer que los detectores de líneas humanos estaban especializados para el color y para la orientación. Y si lo estaban, se podrían poner de manifiesto postefectos que dependieran tanto de la orientación como del color.

McCollough llevó a cabo la demostración de la siguiente manera. Los sujetos miraban rejas de líneas horizontales azules y negras, que iban alternando, a intervalos de pocos segundos, con rejas de líneas verticales naranjas y negras. A los 10 minutos aproximadamente, se les enseñaron rejas de líneas horizontales y rejas de líneas verticales, ambas con líneas blancas y negras. Las rejas horizontales parecían tener un tono naranja descolorido y las rejas verticales estaban teñidas de azul. Este resultado se puede descubrir como un postefecto de color, dependiente de la orientación; se conoce generalmente como efecto McCollough.

No parece probable que el efecto McCollough se origine en la retina. En primer lugar, está claro que los colores percibidos no son simplemente postimágenes complementarias, ya que se puede ver cualquiera de los colores en la misma localización en la retina, y el color percibido depende sólo de la orientación de las líneas en la reja. Además, no es necesario mirar fijamente las figuras para conseguir el efecto McCollough.

Otro aspecto del efecto McCollough que lo diferencia de las postimágenes sencillas es su gran persistencia. Con un período de adaptación de 10 a 15 minutos, el efecto puede seguir siendo visible días o incluso semanas más tarde. Debido a estas características, se considera, más o menos unánimemente, que



EL SISTEMA VISUAL está representado aquí de forma esquemática, para mostrar el flujo de información. Las neuronas en color conducen impulsos procedentes de un solo ojo, en tanto que las que están dibujadas en negro conducen impulsos que proceden de ambos. Por tanto, si un postefecto que ha sido producido en un ojo es transferido al otro ojo, se puede deducir que están implicadas células o bien de la corteza visual del cerebro, o bien del colículo superior. Así, las postimágenes, al contrario de los postefectos, no son transferidas de un ojo a otro; por tanto, el origen de éstas se sitúa en los primeros estadios del proceso visual.

los mecanismos responsables del efecto McCollough se encuentran localizados en la corteza visual del cerebro. Tres años después del descubrimiento de McCollough, Hubel y Wiesel publicaron que la corteza visual del mono contiene neuronas sensibles tanto a la orientación como al color de un estímulo.

Otras comunicaciones sobre la existencia de postefectos dependientes han seguido a los trabajos de McCollough. Norva Hepler, de la McGill University, Charles F. Stromeyer y R. J. W. Mansfield, de la de Harvard, descubrieron, por separado, que los postefectos se pueden hacer dependientes de la dirección del movimiento de una forma patrón. Por ejemplo, si un observador se fija, alternativamente, en una espiral iluminada con luz verde, que gira en el sentido de las agujas del reloj, y en otra iluminada con luz roja, que gira en el sentido contrario, cuando más tarde se le presente otra espiral blanca y negra, ésta parecerá rosada si se la hace girar en el sentido de las agujas del reloj y, verdosa, si giran en sentido contrario.

Investigando en la McGill University, junto con Victor F. Emerson, descubrimos que se puede provocar la dependencia opuesta a la que acabamos de mencionar. (Anstis y John E. W. Mayhew informaron de haber dado con el mismo hallazgo.) Tras observar una espiral verde girando en el sentido de las agujas del reloj, alternando con otra roja girando en sentido contrario, los observadores afirman que una espiral inmóvil parece moverse lentamente en el sentido de las agujas del reloj si es verde y, en sentido contrario, si es roja. Este fenómeno es un postefecto cinético dependiente del color.

Al igual que el postefecto de color dependiente del movimiento, es de larga duración; es decir, aunque el postefecto sea breve para cualquier exposición concreta a una espiral de color, puede reaparecer si se vuelve a mirar la espiral. Tanto el postefecto cinético dependiente del color como el postefecto de color dependiente del movimiento, pueden reaparecer si al observador se le enseñan las figuras patrones que sirven de prueba, 24 horas después de la adaptación.

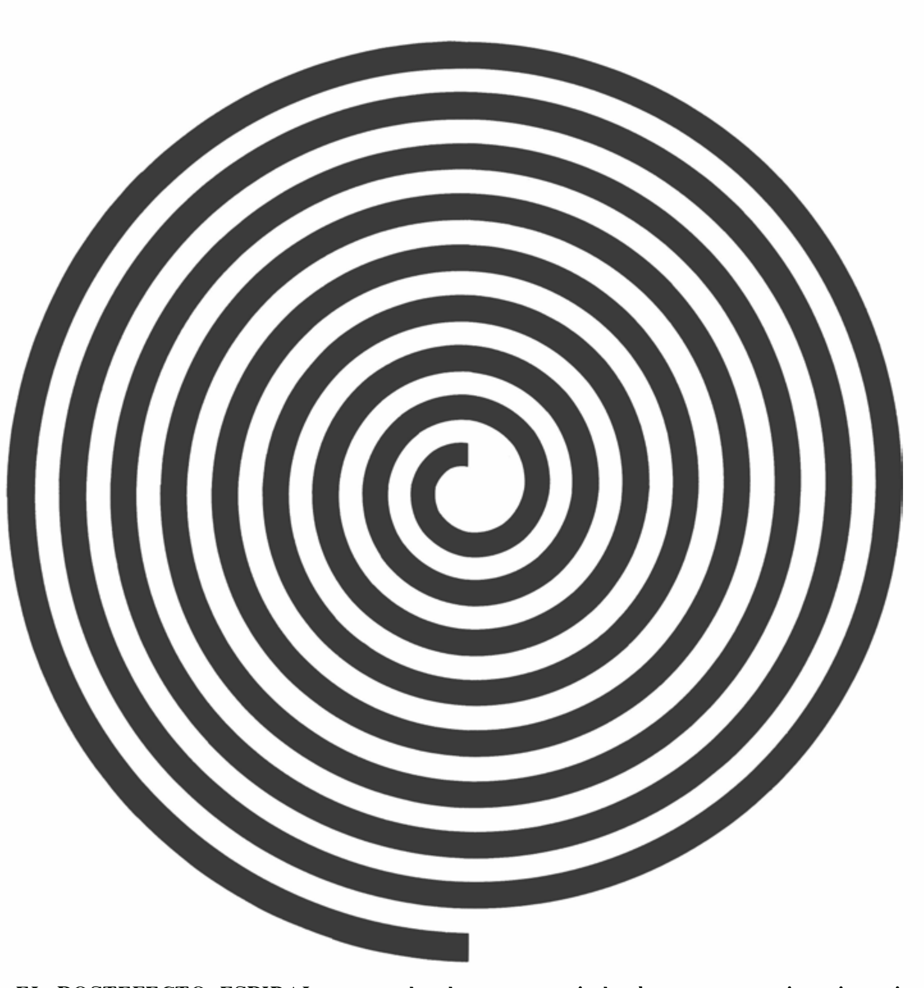
Las pruebas que hemos examinado hasta ahora parecen corroborar la opinión de que los postefectos dependen de las propiedades de los detectores de los rasgos del estímulo, que presentan una estrecha semejanza funcional con las neuronas descritas por Hubel y Wiesel. Sin embargo, los investigadores en el campo de la neurofisiología y en el

de la percepción humanas intentaron demostrar recientemente la existencia de detectores que respondan a propiedades más integradas del panorama visual. Algunos estudiosos opinan actualmente que las neuronas estudiadas por Hubel y Wiesel no funcionan simplemente como detectores de contornos, hendiduras o líneas, sino que contribuyen también a la realización de un análisis de las frecuencias espaciales (el espaciamiento de elementos repetidos de forma más o menos regular) del conjunto de la figura. Se ha visto que ciertas neuronas de la corteza visual del gato dan respuesta selectiva a unos enrejados sinusoidales (barras paralelas que poseen un brillo que varía de forma sinusoidal sobre el enrejado), pero sólo dentro de un estrecho margen de frecuencias espaciales.

Hay postefectos que pueden atribuirse a detectores de frecuencias espaciales. Por ejemplo, Colin Blakemore y Peter Sutton, de la Universidad de Cambridge, descubrieron que, si se atiende a una figura patrón con rayas durante algunos minutos y luego se observa un enrejado que tiene la misma orientación pero con barras ligeramente más estrechas, las barras parecerán más estrechas y menos espaciadas que lo están en realidad. Por el contrario, unas barras de anchura mayor parecerán todavía más anchas *(véase la ilustración al pie de la página 24)*.

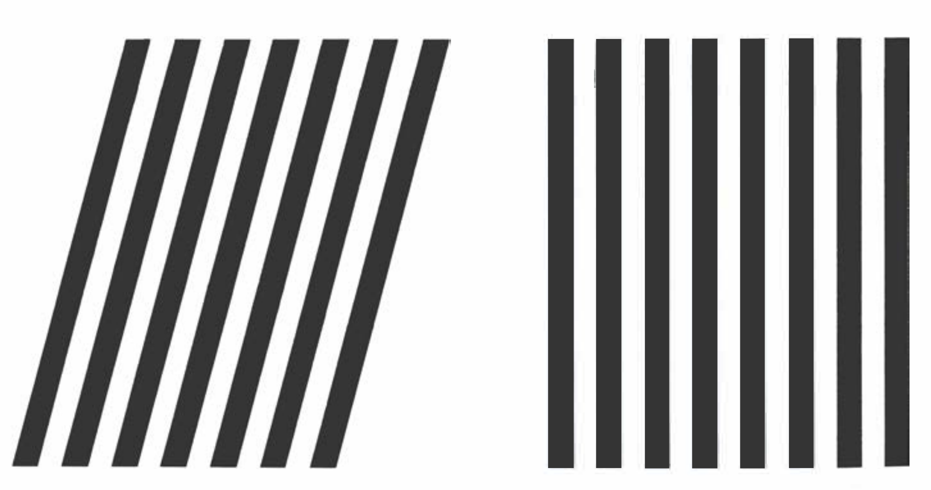
La explicación propuesta por Blakemore y Sutton era similar a la que sugirió Sutherland para los postefectos de inclinación y cinéticos. Afirmaron que un enrejado de una frecuencia determinada despierta la actividad en una subpoblación de neuronas detectoras de frecuencia. La distribución de la actividad es promediada para dar una impresión perceptiva de cuál es la frecuencia expuesta ante la vista. Una preadaptación a alguna otra frecuencia espacial habría causado depresión de la actividad de las neuronas sensibles a esa frecuencia y, por tanto, desplazaría la distribución alejándola de la distribución que normalmente evoca la figura patrón expuesta.

Los postefectos de color también se pueden hacer dependientes de la frecuencia espacial. W. J. Lovegrove y Ray F. Over, de la Universidad de Queensland, sometieron a unos sujetos a la siguiente experiencia: mirar un enrejado vertical con una determinada frecuencia espacial, iluminado con luz roja, en alternancia con otro enrejado vertical con una frecuencia espacial distinta iluminado con luz verde; más tarde, un enrejado de prueba blanco y negro con una frecuencia igual a la del primer enrejado parecía verdoso y otro, con la frecuencia del segundo, parecía rosado. Sin embargo, los postefectos de color sólo se producían si la frecuencia de un enrejado era, por lo menos, el doble de la del otro, y, si la frecuencia de uno de los enrejados al menos, era superior a tres ciclos por grado de ángulo visual. Para Lovegrove y Over, tales resultados podían explicarse en términos de adaptación de las unidades nerviosas sensibles al color y a la frecuencia espacial.

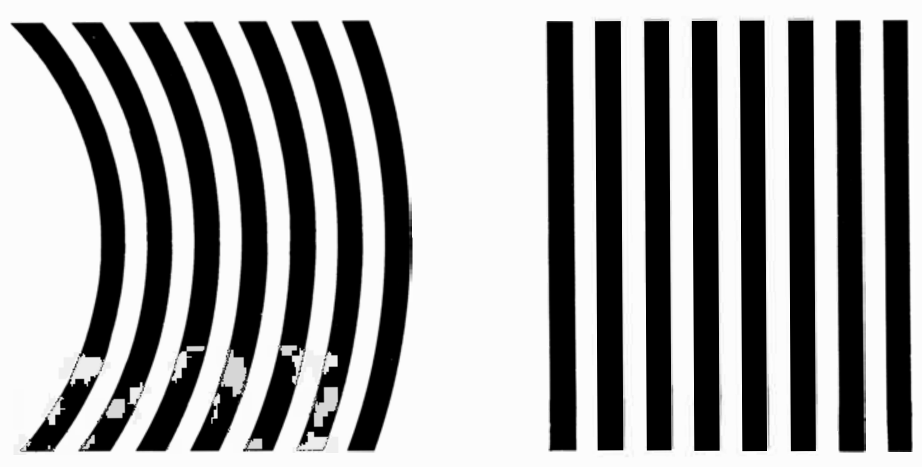


EL POSTEFECTO ESPIRAL ocurre al colocar una espiral sobre una mesa giratoria y girándola a $33^1/_3$ revoluciones por minuto. Al pararse la espiral, parece que gire en sentido inverso.

Una forma adecuada para comprobar la localización de las neuronas responsables de los postefectos en el siste-



EL POSTEFECTO DE INCLINACION se da cuando se contemplan, durante 5 minutos, las lineas inclinadas. Luego, las realmente verticales parecerán inclinadas en la dirección opuesta.



EL POSTEFECTO DE CURVATURA aparece al mirar líneas curvas durante 10 minutos, moviendo los ojos sólo por la porción central. Luego, las rectas parecerán curvarse al revés.

ma visual es averiguar si existen interacciones entre ambos ojos. Por ejemplo, se puede inducir un postefecto en un ojo y luego preguntarle al observador si lo ve cuando mira con el otro ojo. Las neuronas de las vías ópticas, que van desde la retina hasta la corteza visual, conducen impulsos correspondientes a un solo ojo hasta alcanzar el cuerpo geniculado externo. Algunas neuronas de la corteza visual conducen impulsos de procedencia monocular (que provienen de la información recibida en un solo ojo) y otras conducen impulsos de procedencia binocular (que provienen de la información recibida en cualquiera de los ojos). La mayoría de las células del colículo superior (otra región del sistema del proceso visual) conducen impulsos de procedencia binocular. Por tanto, si se observa que un postefecto pasa de un ojo al otro, se puede deducir que es producido por células pertenecientes a la corteza visual, o bien al colículo superior.

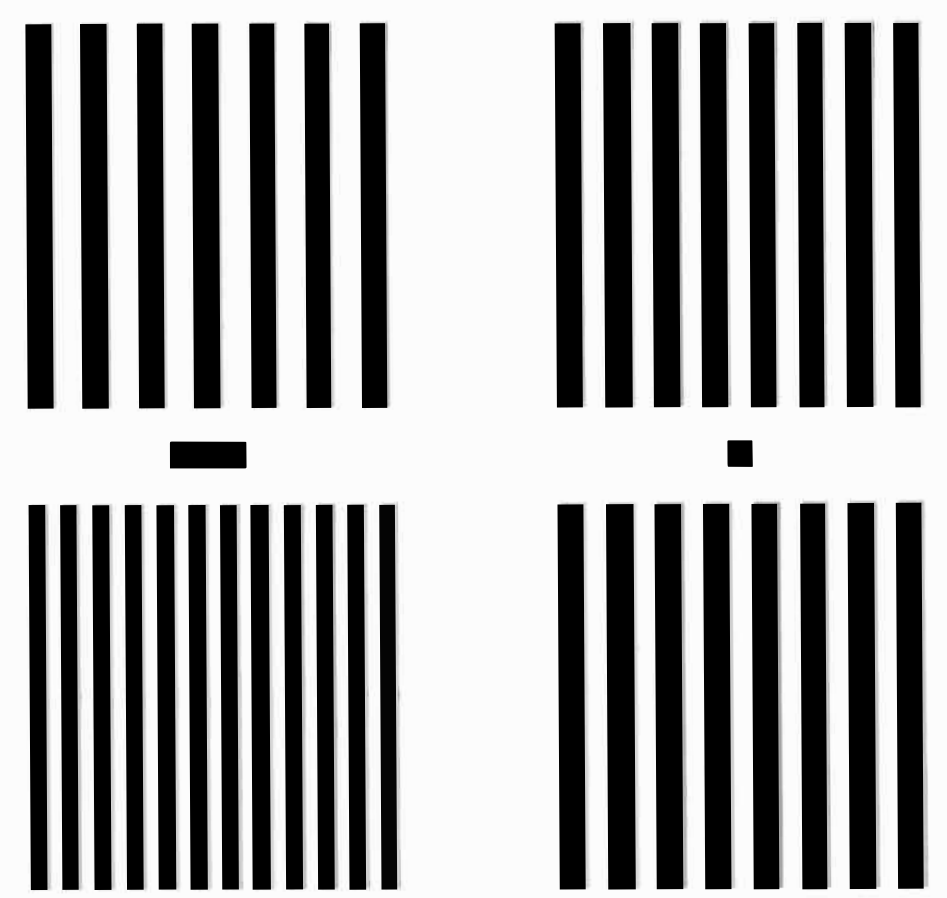
Sin embargo, dado que, según parece, las neuronas del colículo superior son principalmente sensibles al movimiento, su función (si es que la tienen) estaría restringida a los postefectos cinéticos.

Se ha comprobado de forma general que, contrariamente a las postimágenes, los postefectos figurales y cinéticos son transferidos de un ojo al otro, aunque su intensidad queda disminuida durante este proceso. En consecuencia, es probable que en estos postefectos intervengan neuronas que conducen impulsos de procedencia monocular y neuronas que conducen impulsos de procedencia binocular, lo que explica la disminución de la intensidad del efecto.

No parece que los postefectos dependientes en los que uno de los componentes es el color se transfieran de un ojo a otro. Este hallazgo sugirió que quizá estos efectos sean producidos por neuronas que conducen impulsos de procedencia monocular. No obstante, hay algunas pruebas que indican que esta hipótesis podría no ser absolutamente correcta.

Unos experimentos llevados a cabo por T. R. Vidyasagar, de la Universidad de Manchester, han puesto de manifiesto que los postefectos de color dependientes de la orientación pueden implicar la participación de neuronas que recaban información de ambos ojos. Estas neuronas son del tipo binocular, pero no lograron producir una transferencia interocular. Parece posible que otros postefectos dependientes impliquen también la participación de neuronas binoculares de este tipo.

Gerald M. Murch, de la Portland State University, demostró que podían disociarse los componentes de color y cinético de un postefecto. También probó que el componente cinético es transferido de un ojo a otro; no así el componente de color. El procedimiento de Murch implicaba una fase de adaptación y otra de prueba. En la fase de adaptación, presentaba ante el ojo derecho una espiral cuyo movimiento alternaba entre el sentido de las agujas del reloj y el sentido contrario, y, al mismo tiempo, presentaba ante el ojo izquierdo el color



LAS VARIACIONES ESPACIALES también pueden provocar postefectos, según parece, porque algunas neuronas del sistema visual son sensibles a las frecuencias espaciales, es decir, al espaciamiento de las características más o menos regulares de lo que se mira. Se puede obtener el postefecto mirando en primer lugar los dos grupos de barras verticales de la izquierda para ver si son iguales. Luego se mueven los ojos de un extremo a otro de la barra horizontal que está entre los dos grupos de barras verticales, durante cinco minutos. Cuando se desvía la vista hacia la barra horizontal que está entre los enrejados verticales de la derecha, la frecuencia espacial del enrejado de arriba parecerá mayor que la del de abajo. Si se mira la ilustración al revés, entonces las relaciones espaciales aparecerán invertidas.

dependiente, que era, alternativamente, rojo y verde.

En la fase de prueba, el observador miraba una espiral inmóvil verde o roja, primero con un ojo y luego con el otro. El postefecto dependiente (giro en el sentido de las agujas del reloj de la espiral verde y giro en sentido contrario de la espiral roja) sólo se producía, decía, cuando el observador utilizaba el ojo izquierdo. Así pues, la adaptación al movimiento era transferida de un ojo al otro, pero no ocurría así con respecto a la información sobre los colores dependientes.

Del elegante experimento de Murch surge una pregunta general sobre la naturaleza de los postefectos dependientes. Hasta hace poco, se había supuesto de forma general que se debían exclusivamente a la adaptación de neuronas de "funciones múltiples", sensibles a los distintos componentes –tales como el color y la orientación– que sirven de base a los postefectos. Murch y otros investigadores han puesto en tela de juicio esta suposición y, en su lugar, han sugerido que la dependencia puede explicarse por conexiones de asociación entre distintas clases de neuronas, en que cada tipo sería sensible a un único componente de la experiencia visual. Aunque el experimento de Murch no destierra la participación de neuronas de funciones múltiples en la producción de postefectos dependientes, introduce la posibilidad de que dichos postefectos también puedan ser producidos por asociaciones entre neuronas con funciones independientes anteriormente.

Hay otra razón por la que se ha sugerido la posibilidad de que los postefectos puedan basarse en la formación de conexiones de asociación, más que en (o quizá sumándose a) la fatiga; se trata de la persistencia de muchos postefectos dependientes. Como ya quedó apuntado, pueden detectarse días, o incluso semanas, después de transcurrido el período de adaptación.

No tenemos, hasta el momento, prueba alguna neurofisiológica que ponga de manifiesto que la fatiga o la adaptación de las distintas neuronas haya durado alguna vez tan largo tiempo.

Cabe la posibilidad de que la persistencia no esté restringida a los postefectos dependientes, aunque la cuestión de si el postefecto es dependiente o no constituye a veces un difícil problema. Richard F. Masland, de la Universidad de McGill, demostró que las características del postefecto espiral pueden durar 24 horas.

Una de entre nosotros (Favreau) comprobó que puede darse hasta una semana más tarde. La disminución de la magnitud del postefecto espiral es rápida durante los primeros minutos, pero luego la velocidad con que decrece es bastante más lenta.

Por esta misma razón, Masland sugirió que el postefecto tiene dos componentes: un componente de desaparición rápida, debido directamente a la adaptación de detectores de movimiento, y otro componente, más duradero, de desaparición lenta, provocado por la adaptación condicionada. En la adaptación condicionada, aunque los detectores de movimiento no permanecieran en estado de fatiga durante el período total en que el postefecto persiste, la configuración espiral, habiéndose asociado a la fatiga, podría provocar que los detectores retornaran a un estado semejante a la fatiga.

Aunque el concepto de fatiga o adaptación condicionada podría ser útil para explicar la persistencia a largo plazo de los postefectos negativos, presenta un obstáculo. Si las distintas características del estímulo que los produce –tales como una configuración espiral y un movimiento giratorio en sentido de las agujas del reloj– llegan a asociarse la una con la otra, lo que espera uno obtener serían postefectos positivos, más que negativos. Así, por ejemplo, una espiral inmóvil parecería estar girando en la dirección en que se la vio girar previamente, y un enrejado vertical incoloro, empleado como prueba para el efecto McCollough, parecería de color verde si la orientación vertical se hubiera hecho coincidir con el verde. Sin embargo, el aspecto más sorprendente de los postefectos negativos es que, cuando dos características se combinan en un estímulo, una de ellas llega a asociarse posteriormente con la calidad opuesta de la otra (movimiento en la dirección opuesta, color complementario, etc...).

Es plausible que la fatiga pueda llegar a asociarse con aspectos del estímulo adaptador, pues es sabido que los procesos de fatiga empiezan a funcionar en cuanto nos fijamos en un estímulo. Si miramos algo que se mueve constantemente, la velocidad percibida disminuye.

Si se atiende a una superficie de color, éste parece ser cada vez menos intenso. (El lector puede comprobar esta relación mirando una de las manchas de color de la ilustración de la página 19. Si se tapa la mitad de la figura con un trozo de papel gris, y se retira a los 30 segundos, la mitad tapada parece más brillante que la otra mitad descubierta.)

Acabamos de examinar dos posibles explicaciones de los postefectos negativos: la fatiga y la fatiga condicionada. Ambas desempeñan, probablemente, una función. El trabajo de Masland sobre el postefecto espiral demostró que tenía dos componentes. Una de nosotros (Favreau) llevó a cabo experimentos que sugieren una nueva disociación de los componentes a corto y a largo plazo de este postefecto. El postefecto sencillo se puede observar inmediatamente después de mirar una espiral, y también disminuye mucho su intensidad. El postefecto espiral dependiente del color no se ve inmediatamente y no alcanza su intensidad máxima hasta pasados unos minutos. Esto sugiere que, durante una exposición a espirales de giros y colores alternantes, las unidades visuales sensibles a ambas direcciones de giro pueden alcanzar la fatiga y así impedir la aparición rápida del postefecto cinético.

Al irse restableciendo las neuronas de su estado de fatiga, pueden observarse los efectos de los mecanismos que subyacen a la dependencia del color.

Si los postefectos dependientes se basan efectivamente en la formación de conexiones de asociación entre unidades visuales, hay que dilucidar cuántas conexiones se establecen. Una de las posibilidades es que la información de los distintos grupos de neuronas que captan las características del estímulo converja en una vía de interacción mutua a un nivel superior del proceso visual. La interacción (verbigracia, entre el color y el movimiento) quedaría registrada como una adaptación relativa a través de un conjunto de neuronas a un nivel superior. Por tanto, la activación de este sistema por cualquiera de los grupos originales de neuronas podría volver a crear la impresión de adaptación en el otro grupo, produciendo de esta forma el postefecto negativo apropiado.

Esta explicación se sigue fundando en la noción de adaptación o habituación de las neuronas. Estas neuronas hipotéticas se han distinguido por lo menos, de las neuronas que analizan las características del estímulo, las cuales han sido estudiadas de forma intensiva y no se ha observado que presenten efectos de adaptación a largo plazo. Las neuronas de este tipo, que almacenan patrones de interacción por medio de habituación a largo plazo, podrían desempeñar una función de índole general, en el aprendizaje y en la memoria.

Helio 3 superfluido

A una temperatura de unas pocas milésimas de grado sobre el cero absoluto, este isótopo del helio es capaz de fluir a través de poros diminutos sin rozamiento; presenta además efectos magnéticos curiosos

N. David Mermin y David M. Lee

Una de las fronteras de la ciencia física que goza de menos publicidad es la que pertenece al dominio de las temperaturas ultrabajas (muy bajas). Esta frontera se levantó en el año 1911, cuando la primera licuación del gas helio permitió alcanzar temperaturas enormemente bajas, de unos pocos grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). Las técnicas criogénicas de hoy día han progresado hasta tal punto, que las propiedades de la materia pueden ser estudiadas a temperaturas bajísimas, de unas pocas milésimas de grado sobre el cero absoluto.

Existe un incentivo poderoso para realizar tales experimentos. El comportamiento de la materia está regido por el sistema fundamental de leyes físicas que se conoce por teoría cuántica. Aunque toda la materia está sujeta a las leyes de la teoría cuántica, estas leyes suelen manifestarse patentemente sólo en la escala microscópica de los átomos y de sus partículas constituyentes. Los efectos cuánticos también se manifiestan en el comportamiento macroscópico de la materia, pero los más espectaculares e interesantes de tales efectos están enmascarados, o incluso completamente encubiertos, por la agitación térmica aleatoria de los átomos. Cada avance en las técnicas criogénicas que rebaja el intervalo de temperaturas accesibles en otro factor 10, corre las cortinas para mostrar un nuevo tipo de comportamiento cuántico macroscópico, a menudo con beneficios científicos y tecnológicos imprevisibles.

El fenómeno conocido como superfluidez es, probablemente, el ejemplo de comportamiento cuántico macroscópico más espectacular que la investigación a bajas temperaturas haya descubierto hasta hoy. La superfluidez se presenta a unos pocos grados sobre el cero absoluto en el helio 4, la fase líquida del isótopo del helio más abundante, el isótopo de número másico 4. Bajo el nombre de superconductividad, la superfluidez también se manifiesta en los electrones de conducción de muchos metales y aleaciones, a temperaturas que dependen de cada material, pero que no son nunca superiores a unos 25 grados sobre el cero absoluto.

Los superfluidos contradicen toda idea intuitiva acerca de cómo debe comportarse la materia. Un superfluido puede moverse desafiando aparentemente las leyes ordinarias del rozamiento, fluyendo sin esfuerzo a través de obstrucciones suficientes para retardar, o bloquear por completo, el flujo de un líquido normal. Los superfluidos pueden establecer corrientes circulatorias persistentes que muestran una tendencia a desaparecer muy pequeña o nula. Cuando una vasija que contiene helio 4 superfluido gira lentamente, el líquido puede no participar plenamente en la rotación. Otra manifestación similar de comportamiento anormal la constituye el fluido de electrones en un metal superconductor que puede impedir la penetración en el metal de un campo magnético externo. Cuando el campo es aplicado, los electrones, que llevan carga eléctrica, producen las corrientes eléctricas necesarias para generar un campo opuesto de la misma intensidad que el campo aplicado. El campo externo se cancela con el interno y, por tanto, es incapaz de penetrar el medio superconductor.

Hasta hace pocos años, la superfluidez sólo había sido observada en el helio 4 y en los superconductores. Pero, en 1971, se descubrió una tercera forma de superfluidez en el helio 3 líquido, el más ligero y el más escaso con mucho de los dos isótopos no radiactivos del helio. Como dos isótopos de un mismo elemento suelen tener propiedades completamente similares, tal descubrimiento podría parecer poco significativo. Los dos isótopos del helio, sin embargo, son excepciones a la regla: sus formas sólida y líquida difieren fuertemente en casi todas sus propiedades. Desde la mitad de los años 30 a la mitad de los 50 hubieron, pues, buenas razones para creer que el helio 3 no podía ser superfluido; ahora se sabe que el mecanismo de la superfluidez del helio 3 es muy distinto del mecanismo del helio 4.

En efecto, el hallazgo creciente de superfluidez en el helio 3 nos ha proporcionado un superfluido espectacularmente distinto. Aunque los dos helios superfluidos comparten muchas características del flujo superfluido, llevar el helio 3 al estado de superfluidez requiere una temperatura casi 1000 veces menor que la necesitada en el caso del helio 4. Donde el helio 4 líquido tiene una fase normal y una superfluida, el helio 3 tiene una fase normal y tres fases superfluidas distintas. Los helios 3 superfluidos son magnéticos. Además, las fases superfluidas del helio 3 son inherentemente anisótropas: las mediciones de sus propiedades hechas en una dirección pueden dar resultados muy diferentes de las mismas mediciones hechas en otras direcciones. Estos curiosos fenómenos, al igual que los vistos en el helio 4 superfluido y en los superconductores, están todos relacionados con manifestaciones macroscópicas directas de la teoría cuántica. Debe recurrirse inevitablemente a la teoría cuántica, incluso para explicar las apreciables diferencias entre los dos helios líquidos normales, y, en virtud de lo cual, para explicar por qué son líquidos.

Los dos isótopos del helio

Entre todos los líquidos conocidos, los isótopos del helio son los únicos que no se solidifican a presión ordinaria, por baja que sea su temperatura; en principio, podrían enfriarse hasta el cero absoluto y seguir permaneciendo líquidos. El helio sólido puede formarse solamente enfriando el líquido sometido a presión.

Al enfriarse una sustancia, se reduce la energía cinética media de sus átomos o moléculas; si la temperatura baja lo suficiente, las moléculas carecen de la ener-

gía cinética necesaria para vencer las fuerzas intermoleculares que tienden a juntarlas rígidamente. Entonces, las moléculas pierden su movilidad y quedan confinadas en posiciones fijas: la sustancia se convierte en un sólido.

El hecho de que el helio no se solidifique se debe, en parte, a la debilidad de las fuerzas entre sus átomos. El helio es uno de los gases nobles o inertes, es decir, pertenece al grupo de elementos que comprende el neón, argón, criptón y xenón. Las fuerzas interatómicas son excepcionalmente débiles en todos estos elementos. A pesar de lo cual, todos, excepto el helio, se solidifican sin la aplicación de presión, si la temperatura es lo suficientemente baja.

El hecho de que el helio no se solidifique es, quizás, la forma más simple como esta sustancia extraordinaria manifiesta las consecuencias de las leyes de la teoría cuántica. En el helio líquido, por baja que sea la temperatura, los átomos conservan energía cinética suficiente para vencer la atracción de las fuerzas interatómicas. Esto contradice claramen-

PRESION

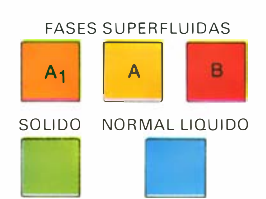
B

A

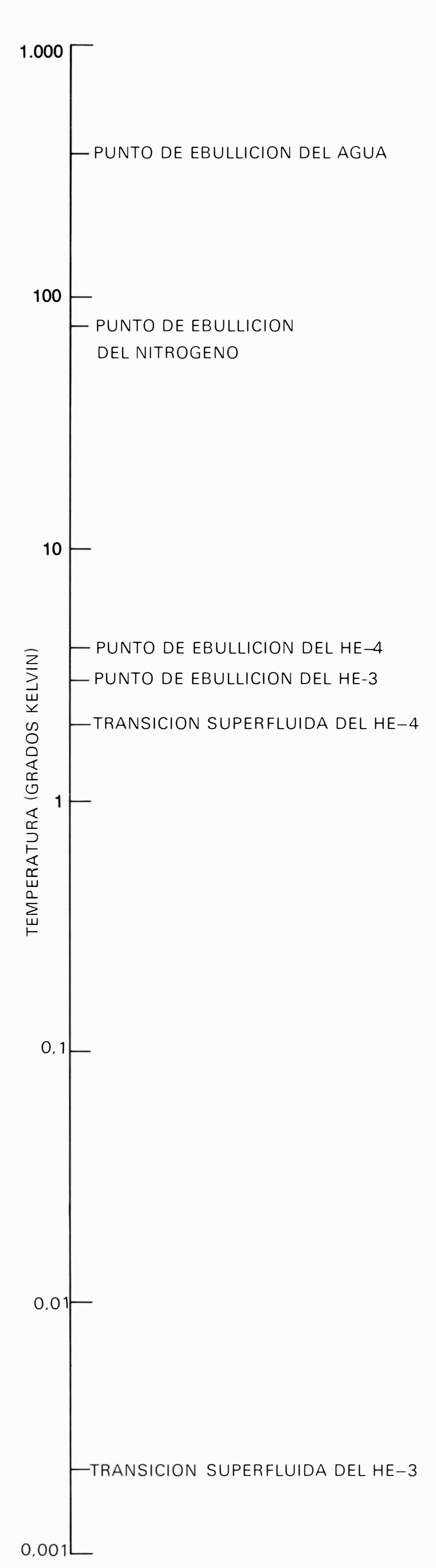
A_1

TEMPERATURA

CAMPO MAGNETICO



CINCO FASES DEL HELIO 3 (además de la fase gaseosa) se encuentran a las temperaturas, presiones e intensidades de campo magnético mostradas en este gráfico tridimensional. Son la fase líquida normal, tres fases superfluidas y la fase sólida. Las regiones correspondientes a las distintas fases están separadas por superficies. Por ejemplo, si a altas presiones (cerca de la parte alta de la región líquida) se reduce la temperatura, un punto, que represente al sistema, pasa primero a través de una superficie que marca la transición entre el líquido normal y la fase superfluida llamada A_1; un mayor enfriamiento produce otra transición a la fase superfluida *A*. Si el campo magnético se anula, la fase A_1 desaparece. Enfriando más, a partir de la fase *A* se revela otra fase superfluida, *B*. El punto negro en la parte posterior del diagrama, donde las tres superficies superfluidas se interseccionan, se conoce como punto policrítico. Por debajo de la presión policrítica, puede alcanzarse directamente la fase superfluida *B* desde la fase líquida normal en ausencia de campo magnético.



LAS TEMPERATURAS DE TRANSICION para los cambios de la fase líquido-vapor en el helio son más bajas que las de cualquier otro elemento; en el punto de ebullición del helio, todas las otras sustancias están congeladas. La temperatura de la transición superfluida del helio 3 es aproximadamente 1000 veces más baja que la del helio 4. Las temperaturas se expresan en la escala de Kelvin, en la que el cero absoluto (-273,15 grados Celsius) se toma como cero grados.

te el punto de vista clásico (es decir, precuántico) de que en el cero absoluto la energía cinética media es necesariamente nula, de suerte que los átomos permanecen, sin moverse, en posiciones fijas.

Según la teoría cuántica, esta predicción no es del todo correcta porque contradice el principio de incertidumbre, que afirma que la posición y el momento de una partícula no pueden especificarse simultáneamente con infinita precisión. En particular, si se conoce la posición de un átomo con bastante precisión, como sucede en un sólido, entonces el momento, o la energía cinética, del átomo debe quedar indeterminado en una cantidad pequeña, pero finita. Inversamente, una partícula no puede tener una energía cinética absolutamente nula y al mismo tiempo ocupar una posición definida. En la estructura cristalina bien ordenada del estado sólido, la posición de un átomo queda especificada con gran precisión, de manera que la energía cinética no puede ser exactamente cero. Incluso en el cero absoluto los átomos conservan una cierta "energía cinética del punto cero", y no se hallan, por tanto, completamente quietos.

La energía del punto cero de un objeto a igualdad de las restantes características aumenta cuando su masa disminuye. El movimiento del punto cero es tan pequeño que no tiene consecuencias para un objeto cuya masa no sea microscópica. El mismo movimiento del punto cero de un átomo individual no tiene en general mayor importancia. El átomo de helio, sin embargo, es el de menor masa de todos los átomos de los gases nobles y, por tanto, tiene un movimiento del punto cero relativamente grande. Excepto a altas presiones, el efecto combinado de este gran movimiento del punto cero y las fuerzas interatómicas extraordinariamente débiles da como resultado el que no se forme una fase sólida estable, sea cual sea la temperatura. Es una coincidencia curiosa que las dos propiedades de baja masa atómica y fuerzas interatómicas débiles, que son las responsables últimas de la gran importancia del helio para los físicos, sean también responsables directas de su utilidad en globos.

Los efectos mecánico-cuánticos no son sólo responsables de la inestabilidad del helio sólido; debe recurrirse a ellos también para explicar el por qué las propiedades físicas más sencillas de los isótopos helio 3 y helio 4 son significativamente distintas. Con la excepción de su masa atómica, los isótopos de un cierto elemento no pueden distinguirse entre sí en razón de sus propiedades físicas y químicas más comunes. Quizás el ejemplo más conocido de esto sea el proporcionado por los isótopos uranio 235 y uranio 238, cuya semejanza es tan intensa que su simple separación requiere esfuerzos heroicos. En contraposición, las mezclas de helio 3 y helio 4 líquidas pueden separarse espontáneamente a determinadas temperaturas, siendo los dos isótopos inmiscibles, como el aceite y el vinagre.

En la naturaleza, casi todo el helio es helio 4. Solamente a partir de la Segunda Guerra Mundial se ha podido obtener helio 3 en cantidades superiores a unas cuantas gotas de líquido. El helio 3 se forma a partir de la desintegración radiactiva del tritio, el isótopo más pesado del hidrógeno; el tritio se produce en un reactor nuclear.

Los átomos de helio 3 y helio 4, como los de cualquier otro par de isótopos, son de estructura casi idéntica, excepto en el pequeño núcleo central. Aparte del núcleo, cada átomo consta de una nube de carga eléctrica negativa generada por dos electrones; para dos isótopos del mismo elemento, estas nubes de electrones son virtualmente indistinguibles en forma y en tamaño. En general, dos isótopos del mismo elemento son tan similares debido a que la mayoría de las propiedades físicas y químicas que nos son familiares están completamente determinadas por la estructura electrónica. El que tanto el helio 3 como el helio 4 sean químicamente inertes constituye un ejemplo de tal similitud, pero en casi todos los otros aspectos las formas líquidas de los dos isótopos son sorprendentemente diferentes.

El distinto comportamiento de los dos isótopos llama la atención porque la única diferencia notable entre ellos está en el núcleo de los átomos. El helio 4 tiene dos protones y dos neutrones en su núcleo: el helio 3 tiene dos protones y un solo neutrón. Olvidando los efectos cuánticos, el único resultado de esta diferencia es que el helio 3 es la sustancia más ligera, siendo la masa de sus átomos cerca de un 25 por ciento menor que la de los átomos de helio 4. Según los principios de la física clásica, esta diferencia de masa no debería incidir en las propiedades térmicas de los dos líquidos. Sin embargo, el helio 3 hierve a una temperatura cerca de un 25 por ciento más baja que el punto de ebullición del helio 4, y necesita una presión aproximadamente un 25 por ciento mayor para que su fase sólida sea estable. Estas discrepancias pueden explicarse en buena parte por el efecto de la diferencia de masas atómicas sobre la energía cuántica del

punto cero. Como el helio 3 es menos pesado que el helio 4, su movimiento del punto cero es mayor. Por tanto, los átomos de helio 3 necesitan menos energía térmica para escapar del líquido al vapor, y se necesita someterlo a una presión mayor para confinarlo en la red rígida del estado sólido.

Propiedades de los núcleos de helio

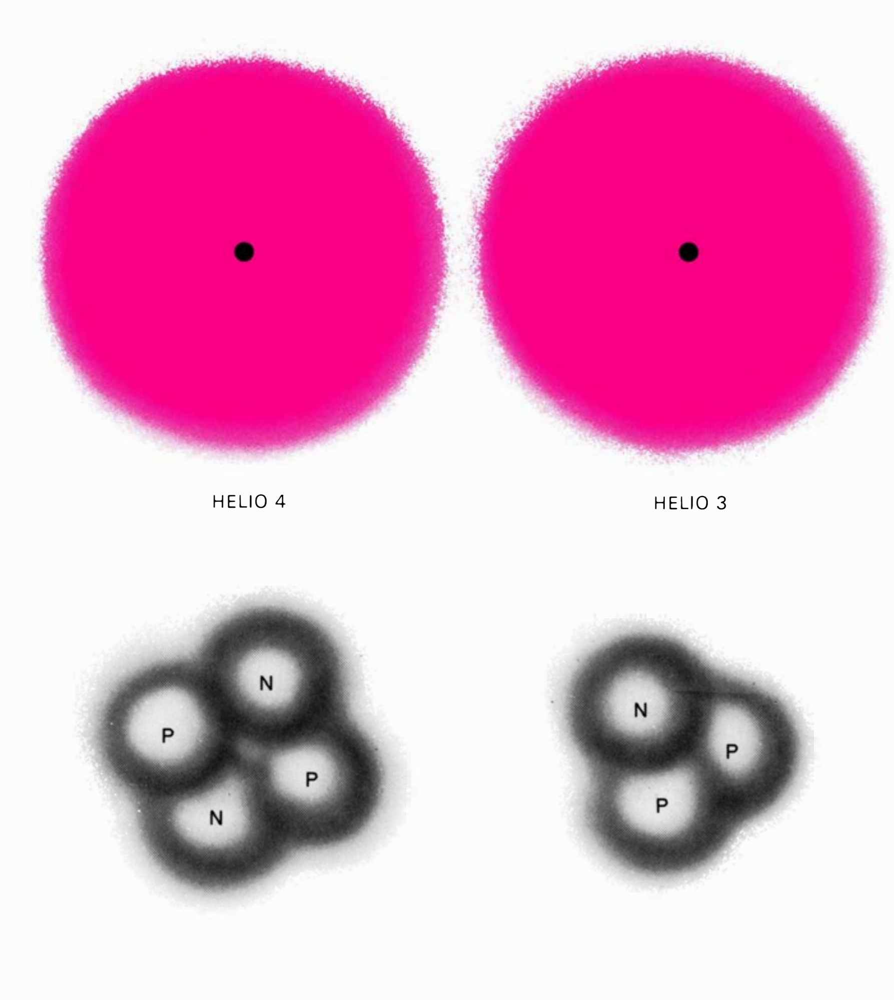
Para explicar la mayoría de las restantes diferencias entre el helio 3 líquido y el helio 4 líquido se debe acudir a otras propiedades del núcleo atómico, un tanto menos familiares que la masa total. El núcleo del átomo de helio 3 gira sobre su eje con un ritmo fijo y permanentemente inalterable, como un giroscopio que tuviera una dosis especificada de energía rotacional y estuviera liberado para siempre de todo frenado por rozamiento. El núcleo de helio 4 no gira en absoluto.

Intimamente relacionado con la presencia o ausencia de spin nuclear, el núcleo de helio 3 es un imán permanente, cuyos polos están situados a lo largo del eje de rotación. El núcleo del átomo del helio 4 no es magnético.

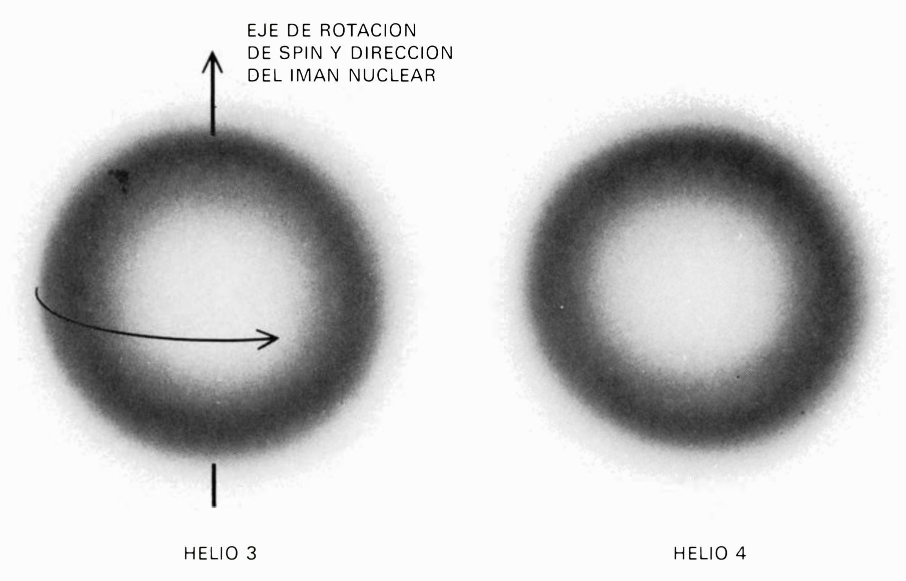
Para describir la diferencia más importante entre los núcleos de helio 3 y helio 4 debemos examinar más atentamente la manera cómo la teoría cuántica describe las partículas. Según la teoría cuántica, las propiedades son asignadas a las partículas y átomos sólo en unidades discretas o cuantos. La carga eléctrica es un ejemplo familiar: en todas las partículas y sistemas de partículas observados, su magnitud es invariablemente algún múltiplo entero de la carga eléctrica de un electrón o un protón. Este hecho se expresa convenientemente asignando a cada partícula un número cuántico de carga eléctrica, que indica simplemente la magnitud de la carga de la partícula y puede sólo tomar los valores discretos observados.

Un ejemplo menos familiar y casi más sorprendente es el ritmo fijo y permanentemente inalterable a que las partículas dotadas de spin realizan su giro. Estos ritmos se hallan limitados también a un conjunto de valores discretos posibles; el valor que caracteriza el spin de un tipo dado de partículas es una propiedad tan permanente de estas partículas como lo es la carga eléctrica.

La carga y el spin de una partícula son ejemplos de números cuánticos con un único valor definido, que es característico de esa especie de partículas. Existen, sin embargo, otros números cuánticos que pueden tener, para una partícula



LAS ESTRUCTURAS ELECTRONICAS DE LOS ISOTOPOS DEL HELIO son casi identicas. Ambos átomos de helio 4 y helio 3 tienen dos electrones que forman una nube esférica de carga eléctrica negativa, que envuelve al núcleo *(arriba)*. Los dos átomos difieren significativamente sólo en sus núcleos, cuyo diámetro es 100.000 veces menor que las nubes electrónicas circundantes. El núcleo de helio 4 consta de dos protones y dos neutrones; el núcleo de helio 3 tiene dos protones, pero un solo neutrón *(muy aumentado, abajo)*. Las propiedades físicas y químicas de los demás materiales están casi determinadas por la estructura electrónica de sus átomos; pero, en el helio, las diferencias en la estructura nuclear crean grandes diferencias en el comportamiento de las formas líquida y sólida de sus dos isótopos.



LAS PROPIEDADES NUCLEARES del helio 3 difieren de las del helio 4. El núcleo de helio 3 gira como un giróscopo y se comporta magnéticamente como una barra permanentemente imantada, orientada según el eje de la rotación del spin. La flecha polar indica la dirección de un polo magnético; la ecuatorial, la del spin. El núcleo de helio 4 carece de ambos.

dada, un conjunto discreto de valores. Estos números cuánticos especifican el movimiento de la partícula como un todo. Sus valores dan información acerca de la posición o momento de la partícula.

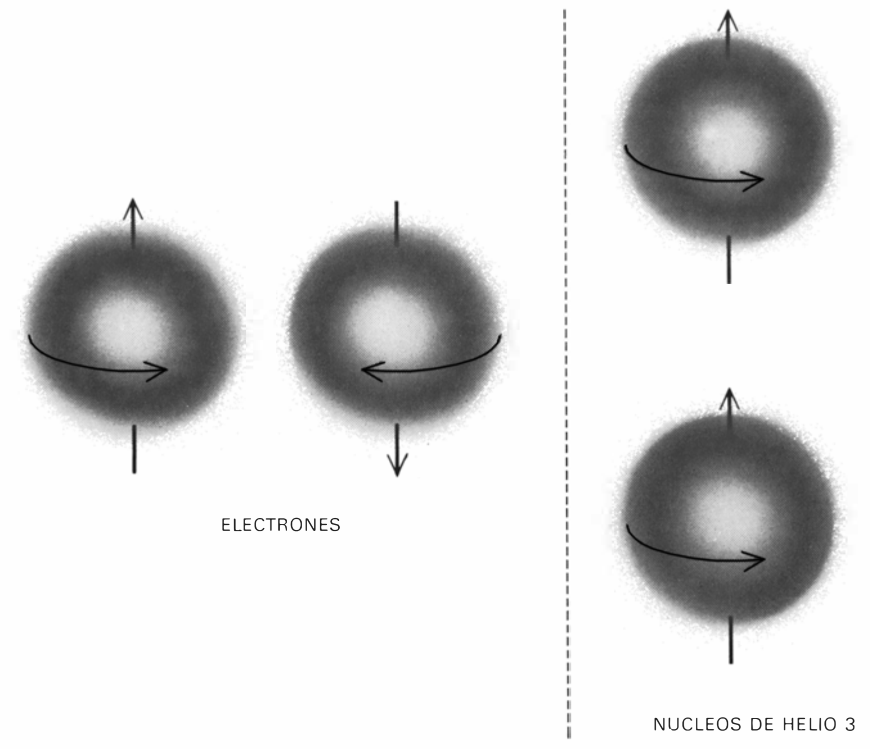
Toda la información que es posible obtener acerca de lo que una partícula está haciendo en un momento dado puede expresarse mediante la enumeración de los valores de todos los números cuánticos de la partícula. De esa lista de números cuánticos se dice que define el estado de la partícula. Una determinación del estado de una partícula contiene todo lo que es posible decir sobre la partícula, incluida la información (dentro de los límites impuestos por el principio de incertidumbre) sobre su posición, su momento y su energía cinética.

Al describir el helio 3 líquido o el helio 4 líquido, o al describir los electrones de conducción en un metal superconductor, se está analizando el comportamiento de grandes grupos de partículas idénticas. Existe una clase de partículas elementales conocidas como fermiones, de la cual electrones, protones y neutrones son los ejemplos más familiares e importantes, cuyo comportamiento en un agregado está limitado por la regla de que dos fermiones del mismo tipo no pueden estar en el mismo estado. Dados dos electrones, por ejemplo uno de sus números cuánticos, al menos, debe ser distinto. Dos fermiones no pueden comportarse exactamente de la misma manera. La aplicación de esta ley a las órbitas de los electrones de los átomos es fundamental para la explicación teórica de la tabla periódica de los elementos, pero también entra en juego en muchos contextos menos familiares y resulta de importancia fundamental para entender la diferencia en las propiedades del helio 3 líquido y del helio 4 líquido.

No todas las partículas elementales son fermiones. Hay una segunda clase de partículas llamadas bosones, de la que son ejemplos los fotones y los mesones pi. Aunque dos fermiones no pueden estar en el mismo estado, para los bosones no existe un principio de segregación equivalente. Los bosones pueden permanecer juntos en un mismo estado en cantidades ilimitadas. En efecto, bajo ciertas condiciones, una fracción considerable de todos los bosones, en un gran sistema de partículas, pueden ocupar el mismo estado cuántico. Este agrupamiento de bosones en el mismo estado cuántico se conoce como condensación de Bose-Einstein. Un conjunto de bosones pueden o no estar en un estado de condensación de Bose-Einstein. Para un sistema de fermiones, sin embargo, tal condensación queda estrictamente prohibida.

Todas las partículas elementales conocidas (y según los puntos de vista teóricos usuales, todas las partículas que se descubran o se inventen) o son bosones o son fermiones. Los núcleos o los átomos (por ejemplo los de cualquiera de los isótopos del helio) son partículas compuestas. Los núcleos constan de protones y neutrones elementales; cada átomo tiene, además, una nube de electrones elementales rodeando su núcleo. Los átomos están, por tanto, compuestos de tres clases de partículas elementales, todas las cuales son fermiones.

El comportamiento de un agregado de partículas idénticas compuestas de dos o más fermiones está sujeto a las mismas restricciones que el comportamiento de las partículas elementales. El que tales partículas compuestas sean bosones o fermiones viene determinado por una regla muy simple: Las partículas compuestas de un número impar de fermiones (de las que un único fermión es el ejemplo más sencillo) se comportan como fermiones, mientras que las partículas compuestas de un número par de fermiones se comportan como bosones. Así, el helio 4, que consta de dos electrones ligados a un núcleo de dos protones y dos neutrones, es un bosón porque está compuesto de seis fermiones, mientras que el helio 3, con un neutrón menos en su núcleo, está compuesto de sólo cinco fermiones y es, por tanto, él mismo un fermión. Esta misteriosa distinción determina la más profunda de todas las diferencias entre los dos helios líquidos.



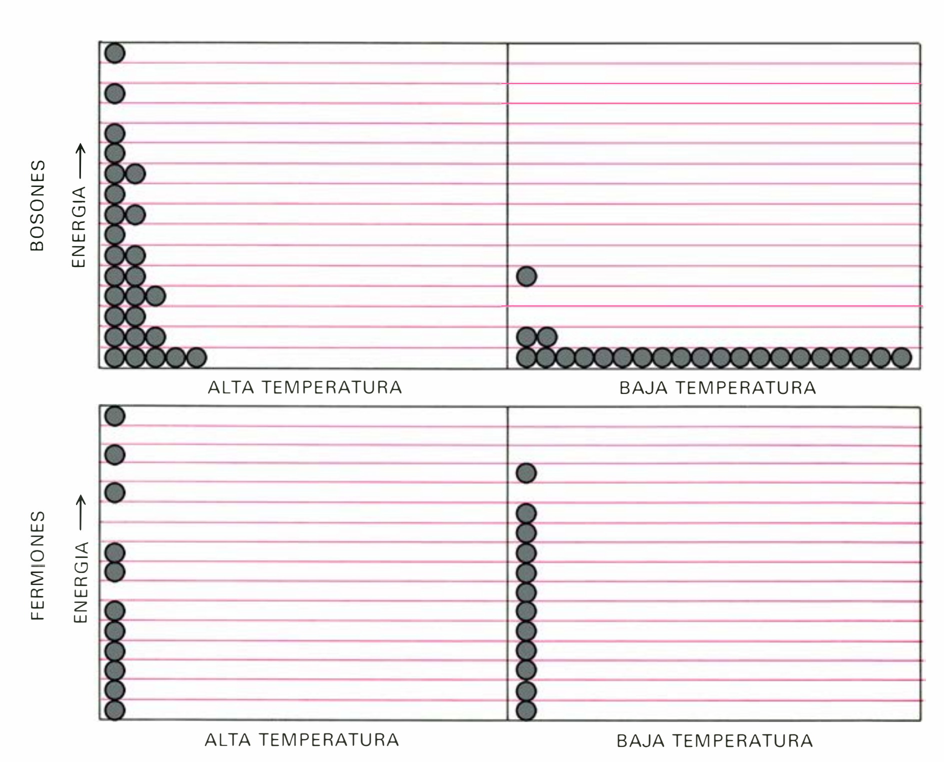
LAS ENTIDADES CONDENSADAS en los superconductores y en el helio 3 superfluido son pares ligados de fermiones. La superconductividad aparece en un metal cuando la temperatura es lo bastante baja para que los electrones formen pares ligados bajo la influencia de una fuerza débil atractiva. De una manera similar, la superfluidez aparece en el helio 3 líquido cuando pares de átomos se ligan entre sí. En un par de electrones ligados en un superconductor, los imanes elementales se oponen uno a otro y el par no tiene magnetismo intrínseco resultante. Los electrones también giran en direcciones opuestas. Los pares ligados de átomos de helio 3 son muy diferentes. Los imanes se refuerzan mutuamente; así, el par posee un magnetismo resultante. Los núcleos de helio 3 tienen la misma dirección de spin.

La transición superfluida

Las primeras manifestaciones del comportamiento superfluido en el helio 4 fueron observadas en 1911, poco tiempo después de la primera licuación del helio; hacia finales de la década de los años treinta, la mayoría de las características del comportamiento superfluido habían sido ya observadas. Cuando la temperatura del helio 4 líquido desciende por debajo de 2,17 grados Kelvin, sus propiedades cambian de manera brusca y discontinua. A una temperatura de transición inferior a ésa, el helio 4 líquido se convierte bruscamente en un perfecto conductor del calor y es capaz de escaparse, fácilmente y sin rozamiento, a través de pequeñas fisuras y poros que serían completamente impenetrables a temperaturas más elevadas.

Por los años treinta se avanzó la hipótesis de que la transición superfluida en el helio 4 líquido podría estar relacionada con la condensación de Bose-Einstein, y se pensó que, si esto era así, el helio 3 líquido, al estar compuesto de fermiones, carecería de una fase superfluida. La obtención de helio 3 en cantidades suficientemente grandes para estudios de la fase líquida era, por tanto, ansiosamente esperada. Por la década de los años cincuenta, se comprobó que a ninguna temperatura próxima a los 2,2 grados tenía lugar la transición al superfluido en el helio 3. Experimentos posteriores revelaron que el helio 3 podía ser enfriado hasta temperaturas de una centésima de grado sin mostrar el más pequeño signo de superfluidez. Estos descubrimientos se tomaron como prueba de que la condensación de Bose-Einstein desempeñaba un papel vital en la superfluidez del helio 4. La opinión general contemporánea considera el helio 4 superfluido como un líquido que ha sufrido la condensación de Bose-Einstein. El posterior descubrimiento de la superfluidez en el helio 3 a unas pocas milésimas de grado sobre el cero absoluto no ha modificado esta convicción. El mecanismo que ocasiona esta superfluidez es muy diferente.

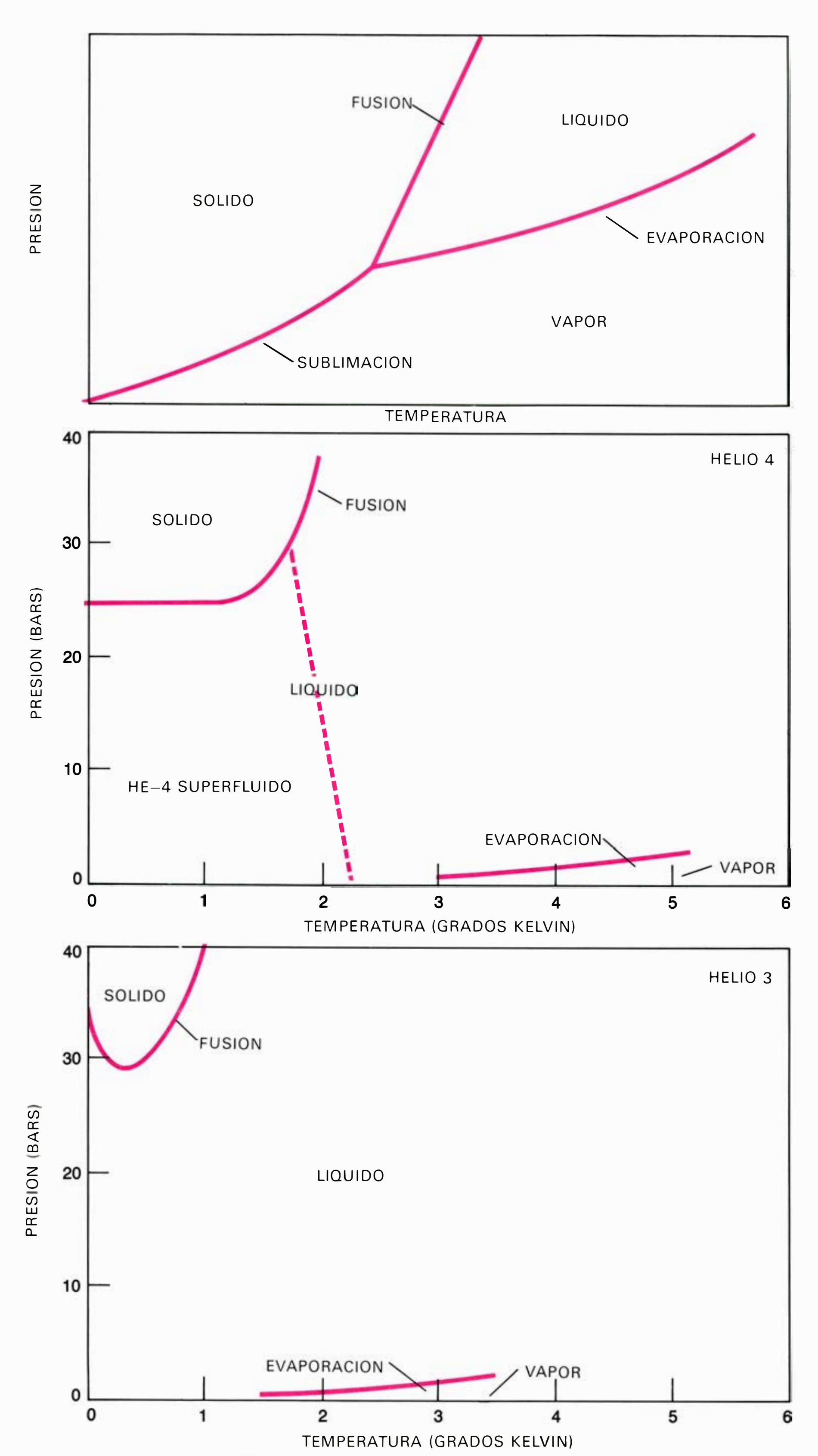
A la hora de indicar porqué la condensación de Bose-Einstein puede llevar a las propiedades características de superfluidez del helio 4, nos puede ayudar una analogía con otro sistema más familiar en el que los efectos mecánico-cuánticos condicionan las propiedades macroscópicas de la materia. Cuando André-Marie Ampère propuso en el siglo XIX que el magnetismo de un imán permanente podía deberse al flujo de unas corrientes eléctricas microscópicas persistentes, se le objetó que tales corrientes disiparían rápidamente su energía en calor y terminarían por desaparecer. Ampère hizo valerosamente caso omiso de tal inconveniente y su punto de vista se vio más tarde confirmado por la teoría cuántica. Puesto que las propiedades físicas en la escala atómica pueden variar sólo en cantidades discretas, la erosión gradual y continua de una corriente atómica por causa de la fricción resulta imposible. En el dominio de los átomos individuales, donde las propiedades están especificadas por números cuánticos discretos, las cosas no se desgastan: éstas, o bien permanecen perfectamente inalteradas, o bien se transforman bruscamente en otras cosas distintas. Si, como sucede a menudo, hay razones por las que ningún estado de un conjunto de estados alternativos discre-



UN CONJUNTO DE BOSONES está sujeto a leyes cuánticas distintas de las que se aplican a un conjunto de fermiones. Cualquier número de bosones puede tener exactamente el mismo conjunto de números cuánticos, y, a muy bajas temperaturas, es posible que una apreciable fracción de ellos se halle justamente en el mismo estado. Los fermiones obedecen una regla diferente: sólo un fermión puede tener un conjunto dado de números cuánticos, de manera que nunca es posible tener más de un fermión en un estado dado. En un modelo simple, estas reglas conducen a las clases de comportamientos distintos que siguen. A altas temperaturas, los bosones están distribuidos entre muchos estados, que pueden o no estar ocupados por más de un bosón. A bajas temperaturas, sólo los estados de menor energía están ocupados apreciablemente, y el número de bosones en el estado de menor energía puede compararse realmente al número total de bosones del sistema. Puesto que sólo un fermión puede ocupar un estado dado, todo lo que puede suceder cuando la temperatura baja es que los estados ocupados pasen a ser los del grupo de menor energía. Sin embargo, la energía no puede reducirse posteriormente asignando más de un fermión a los estados del grupo de menor energía.

	HELIO 4	HELIO 3	SUPERCONDUCTORES
TEMPERATURA DE TRANSICION (GRADOS KELVIN)	DE 1,75 a 2,2	DE 0,001 A 0,0027	DE O A 23
PARTICULAS ELEMENTALES DEL FLUIDO	ATOMOS	ATOMOS	ELECTRONES
MAGNETISMO	NO	SI	SI
ESTADISTICA	BOSON	FERMION	FERMION
CARGA ELECTRICA	NO	NO	SI
ENTIDADES CONDENSADAS	ATOMOS	PARES DE ATOMOS	PARES DE ELECTRONES
SIMETRIA ESPACIAL	SI	NO	SI
MAGNETISMO	NO	SI	NO
EXPULSA EL CAMPO MAGNETICO	NO	NO	SI
NUMERO DE FASES SUPERFLUIDAS	UNA	TRES	UNA

LAS PROPIEDADES DE LOS SUPERFLUIDOS están determinadas por la naturaleza de las partículas que forman el fluido y por el modo como aquellas partículas se condensan para formar la fase superfluida. El helio 4 superfluido está formado por la condensación de Bose-Einstein de átomos individuales de helio 4, que son bosones neutros, no magnéticos y sin spin. En un superconductor, las entidades condensadas son pares de electrones. Los electrones tienen carga eléctrica, pero el magnetismo asociado con el spin del electrón se cancela en cada par. El helio 3 superfluido tiene características del helio 4 superfluido y características de un superconductor, pero también tiene características que no son compartidas por ninguno de los otros dos superfluidos. Debido a que los pares no son especialmente simétricos, las propiedades del helio 3 superfluido pueden presentar una gran dependencia en la dirección; al ser magnéticos los pares, se ha obtenido toda una nueva categoría de comportamiento cuántico, macroscópicamente observable. Porque el fluido permite la introducción de un campo magnético, pueden observarse convenientemente nuevos fenómenos magnéticos; y porque hay tres fases superfluidas, el estudio del comportamiento cuántico macroscópico es variado.



LOS DIAGRAMAS DE FASES muestran el estado de una sustancia a distintas presiones y temperaturas. En la mayoría de sustancias *(arriba)*, **la fase líquida no puede existir a bajas temperaturas, independientemente de cuál sea la presión. Un ejemplo familiar de este comportamiento es la conversión directa del "hielo seco o nieve carbónica" en dióxido de carbono gaseoso, sin fase líquida intermedia, a presiones suficientemente bajas. El helio es la única sustancia que permanece líquida incluso en el cero absoluto a menos que se le aplique una presión considerable. El punto de ebullición del helio 3** *(abajo)* **está cerca de un 25 por ciento más bajo que el del helio 4** *(medio)*, **y la presión de solidificación es cerca de un 25 por ciento más alta. El helio 3 se distingue por tener un punto de presión mínima en su curva de fusión; a temperaturas por debajo de la mínima, la solidificación del helio 3, a una presión fija, precisa la aplicación de calor (en contraste con otras sustancias, a las que debe extraérsele). Las fases superfluidas del helio se detallan en la página 27.**

tos está permitido, entonces ningún tipo de cambio puede ocurrir.

Esta discontinuidad y rigidez característica de los procesos atómicos es inapreciable en la materia macroscópica ordinaria, debido a que el número de átomos que contiene es tan grande que, aunque cada átomo obedece las leyes cuánticas, el efecto combinado de su comportamiento discontinuo no se puede distinguir de una perfecta continuidad. En un imán permanente, sin embargo, las corrientes atómicas microscópicas descritas por Ampère transcurren de forma que una refuerza a la otra.

Análogamente, en un sistema que ha sufrido la condensación de Bose-Einstein, una fracción apreciable de todos los átomos se comportan como si estuvieran justamente en el mismo estado mecánico-cuántico: como resultado de lo cual, sus movimientos están muy correlacionados. Se hallan como si se movieran a paso de marcha, y, por tanto, uno puede reforzar al otro las propiedades cuánticas características: tales propiedades podrán observarse luego en el comportamiento macroscópico del sistema.

El flujo sin fricción del helio superfluido a través de pequeñas fisuras puede considerarse análogo a la corriente amperiana en un imán permanente. En ambos casos, el comportamiento cuántico microscópico se multiplica en la escala macroscópica. En el caso de un imán, la amplificación (o multiplicación) se alcanza por la disposición ordenada de las corrientes atómicas individuales; en el caso del helio 4 superfluido se produce por la condensación de Bose-Einstein de los átomos.

Quienes gusten meditar sobre los misterios de la teoría cuántica pueden detenerse en este punto para contemplar la diferencia de comportamiento de los dos helios líquidos a temperaturas desde 0,01 grados hasta dos grados sobre el cero absoluto. El helio 3 líquido se comporta muy correctamente; se hace algo más lento de movimientos a medida que la temperatura baja, adquiriendo la viscosidad característica del aceite de máquinas ligeras. El helio 4, sin embargo, se desliza a través de fisuras infinitesimales, tan pequeñas, que son impenetrables incluso para un gas, y, por otro lado, se comporta con resortes inesperados. A pesar de ello, los átomos de los que los dos líquidos están formados son idénticos en casi todos los aspectos. La única diferencia está en lo más profundo del interior del átomo. Allá, bien apantallado por la casi impenetrable nube de electrones, en un núcleo que ocupa sólo una milmillonésima de millonésima del

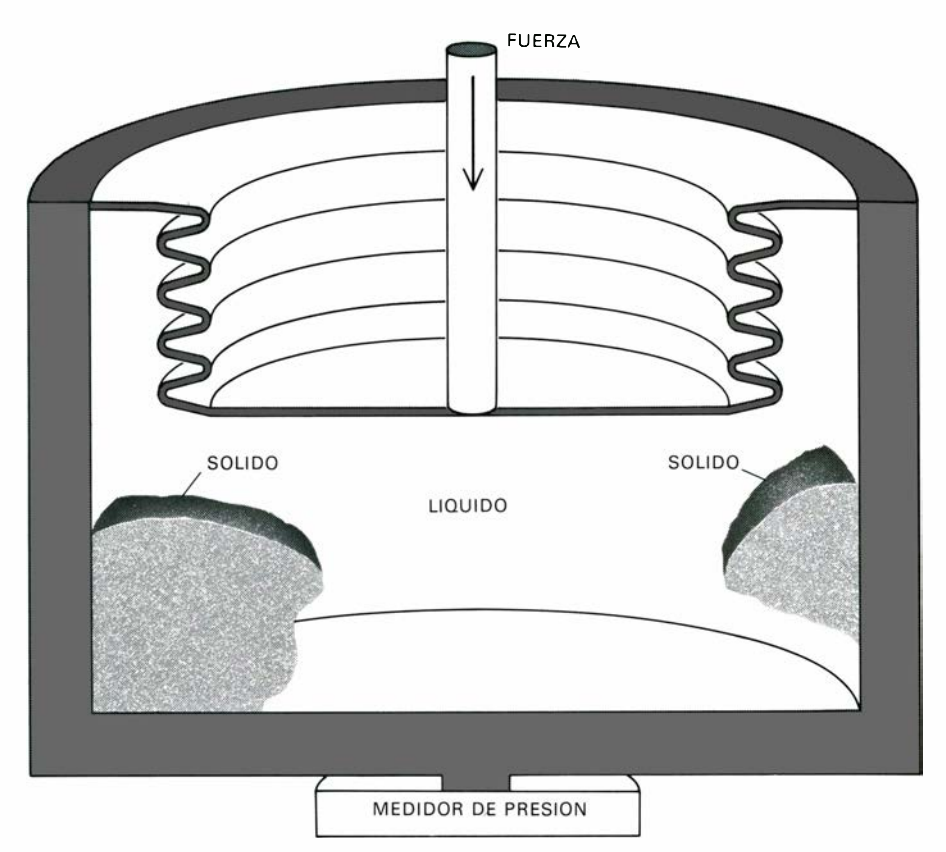
volumen de todo el átomo, al helio 3 le falta un neutrón.

Superconductividad

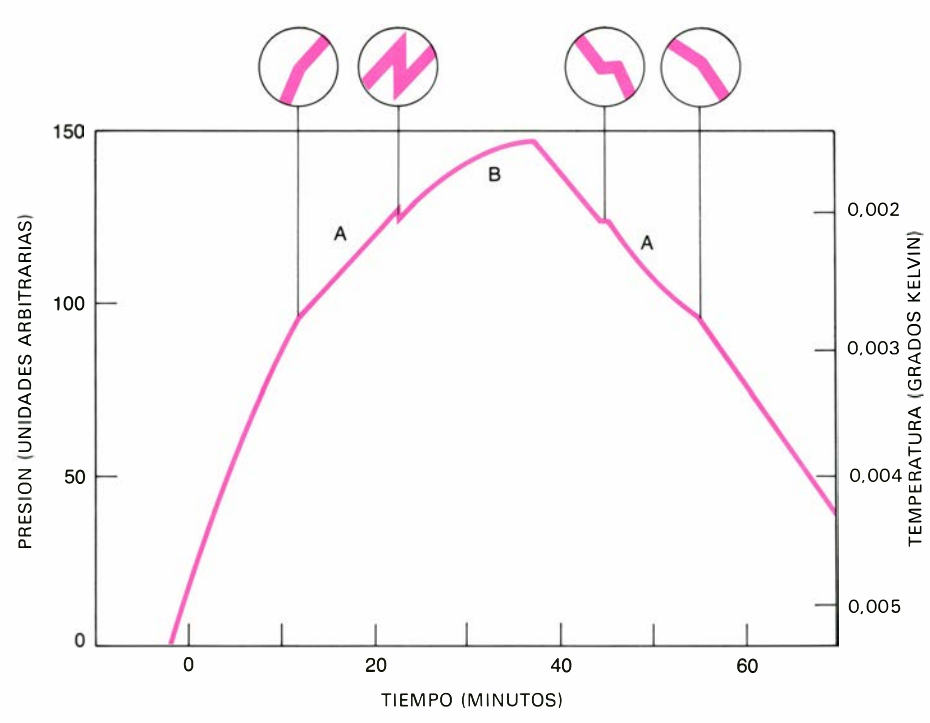
A pesar de los fracasos de primera hora por descubrir una transición superfluida en el helio 3, la sustancia era de un interés apreciable como un sistema de fermiones que permanece en estado líquido incluso en el cero absoluto. Aunque el helio 3 es el único líquido convencional que se comporta de esta manera, sistemas análogos de fermiones son los formados por los electrones de conducción en los metales, por los protones y neutrones en un núcleo atómico grande y por los neutrones que componen la materia en una estrella de neutrones. Como resultado, el helio 3 líquido ha sido objeto de considerable interés por parte de los físicos del estado sólido y motivo de interés ocasional por parte de los físicos nucleares y los astrofísicos. La interacción, durante las décadas de 1950 y 1960, entre el estudio del helio 3 líquido y el estudio de los electrones en los metales resultó de particular provecho; en cierto modo, porque el helio es, en muchos aspectos, el sistema más simple. Los electrones de conducción tienen una carga eléctrica negativa y existen sólo dentro de un molde de iones metálicos cargados positivamente. Los átomos de helio 3, por otro lado, son eléctricamente neutros y pueden estudiarse en estado puro, contaminado sólo por unos pocos átomos dispersos de helio 4.

Después de todo, la posibilidad de que el helio 3 pueda ser un superfluido se apoya en esta analogía entre los átomos de helio 3 y los electrones de conducción. Hemos indicado que, en muchos metales, los electrones de conducción pasan a un estado de superfluidez electrónica, o superconductividad, cuando se enfría el metal a muy bajas temperaturas. En un metal superconductor, las corrientes eléctricas fluyen sin pérdida apreciable de energía, como un superfluido fluye sin rozamiento a través de pequeños poros.

Puesto que los electrones son fermiones, la superconductividad no puede explicarse por una analogía directa con el comportamiento superfluido del helio 4; para los electrones la condensación de Bose-Einstein es imposible. Una caracterización fundamental de las analogías y diferencias entre la superfluidez de los electrones y la del helio 4 se obtuvo en 1956 con la teoría de apareamientos de John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer. Su teoría de la superconductividad está basada en una



EL ENFRIAMIENTO POR COMPRESION logra temperaturas extraordinariamente bajas, aprovechándose de que el helio 3 absorbe calor cuando se solidifica. El aparato se enfría primero, mediante un refrigerador externo, hasta temperaturas de 0,02 grados Kelvin, muy por debajo del mínimo de la curva de fusión. Se aplica luego presión a una cámara que contenga, a la vez, helio 3 sólido y líquido. A medida que la presión aumenta, se va cristalizando más helio sólido, absorbiendo calor del líquido y enfriando más ambas fases. Las fases superfluidas del helio 3 se descubrieron en un experimento que empleaba este método de refrigeración. Con un medidor sensible de presión en la parte inferior de la cámara se registró una anomalía de la presión que indicaba la transición superfluida en el líquido.



LA PRIMERA PRUEBA DE TRANSICIONES a fases superfluidas en el helio 3 apareció cuando se detectaron pequeños cambios en el ritmo de enfriamiento y calentamiento en una célula de enfriamiento por compresión. El gráfico representa la presión en la célula *(escala de la izquierda)* a medida que se reducía su volumen, primero a un ritmo uniforme, y, después, aumentado. A partir de las presiones se pueden calcular las temperaturas equivalentes *(escala de la derecha)*. Pequeñas discontinuidades representan transiciones del líquido normal de la fase *A* a la fase *B*, volviendo luego, a través de la fase *A*, al líquido normal.

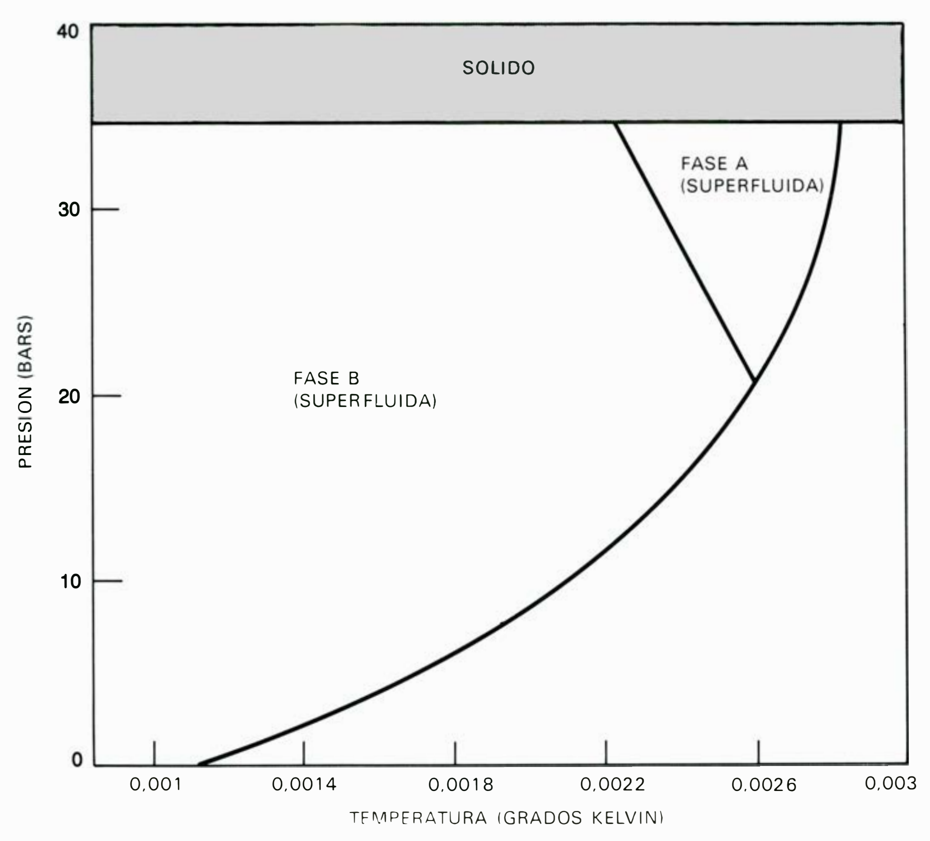
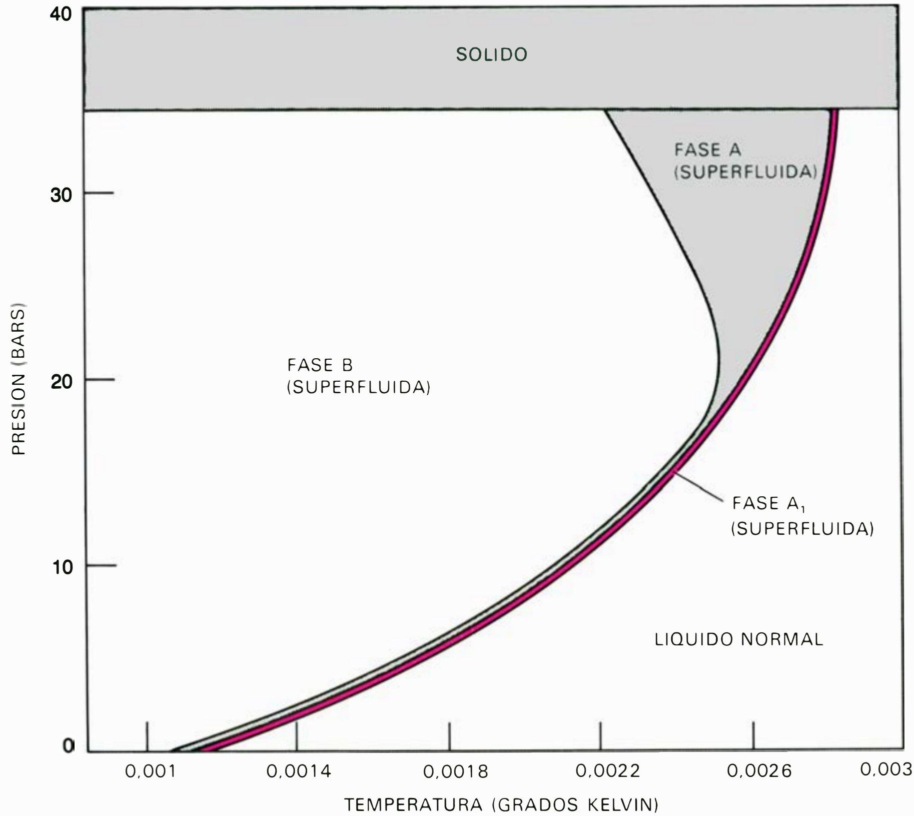


DIAGRAMA DE FASES del helio 3 que muestra la existencia de superfluidos cerca del cero absoluto. En ausencia de un campo magnético, hay sólo dos fases superfluidas, *A* y *B*, que se diferencian por sus propiedades magnéticas y mecánicas. En ausencia de un campo magnético externo, la fase *A* existe solamente en el caso de que medien presiones elevadas.



UN CAMPO MAGNETICO modifica el diagrama de fases del helio 3. En un campo externo, la transición *A* se desdobla en dos transiciones por la aparición de una nueva fase superfluida, A_1. En un campo magnético, ambas fases *A* y A_1 pueden extenderse dentro de una estrecha región del diagrama hasta una presión nula; no se puede ir directamente del líquido normal a la fase *B* del superfluido. Estas líneas de transiciones de fase corresponden a las intersecciones que muestra la ilustración situada en la página 27 que se refieren a un plano paralelo, al plano P-T, con las superficies respectivas que separan las fases superfluidas.

característica peculiar de la fuerza entre electrones de conducción en un metal. En el vacío, dos electrones se repelen mutuamente porque llevan cargas electrostáticas del mismo signo. En el interior de un metal, sin embargo, la fuerza entre electrones puede tener una componente atractiva generada mediante una interacción intermedia de los electrones con los iones metálicos cargados positivamente.

Esta fuerza atractiva entre los electrones de conducción es muy débil, pero, a temperaturas suficientemente bajas, puede conducir a la formación de pares ligados de electrones. La teoría del apareamiento mostró que un sistema de fermiones puede formar tales pares ligados independientemente de cuán débil sea la fuerza atractiva; la reducción de la magnitud de la fuerza aumenta simplemente la distancia entre los electrones que constituyen el par y baja la temperatura a la que el par empieza a formarse.

Los pares de electrones producidos de esta manera están todos en el mismo estado mecánico-cuántico: un estado de condensación de Bose-Einstein. Esto parece en contradicción con la regla de que los fermiones no pueden sufrir la condensación de Bose-Einstein. Pero las entidades condensadas en un superconductor no son electrones singulares, sino pares de electrones ligados. Estos pares, por constar de dos fermiones, son bosones.

Apareamiento en helio 3

La condensación de Bose-Einstein de pares de electrones de conducción lleva a la superconductividad, por razones muy similares a las que relacionan la superfluidez del helio 4 con la condensación de sus átomos. Hay, sin embargo, notables diferencias entre las dos clases de condensación. Por un lado, las entidades condensadas en un superconductor (los pares de electrones) pueden existir sólo cuando *están* condensadas, mientras que los átomos de helio 4 existen tanto en el fluido normal como en el superfluido. Además, debido a que la fuerza de enlace entre los electrones es débil, los pares son bastante grandes. No pueden existir pares individuales separados; se solapan entre sí, de suerte que en el interior de un par dado se halla el centro de masas de millones de otros pares.

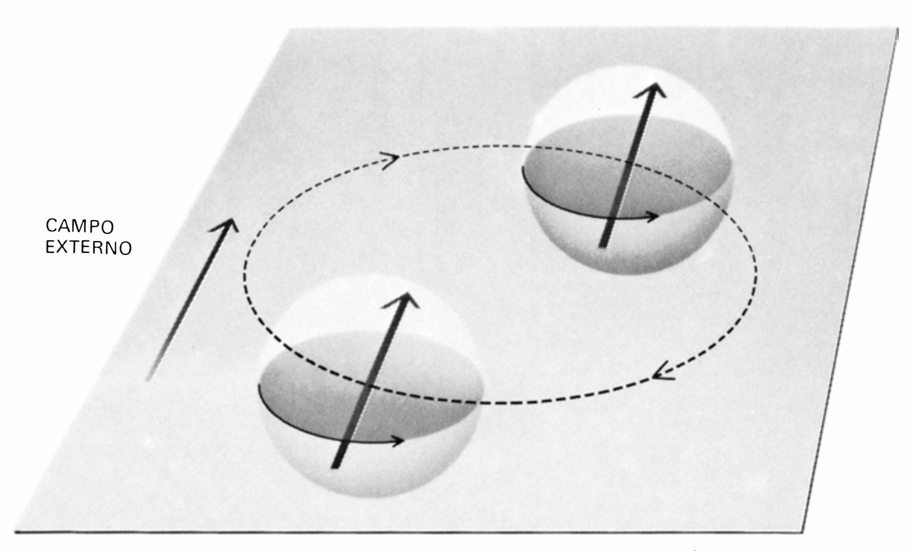
La teoría de los pares de electrones en superconductividad sugirió muy pronto la posibilidad de fenómenos análogos en helio 3. Como los electrones, los átomos de helio 3 son fermiones, y ejercen entre sí una fuerza atractiva débil. Esta fuerza, que pertenece al tipo de fuerzas de van der Waals, es propia de todos los átomos

neutros y es responsable, en primer lugar, de la condensación del gas a la fase líquida. La existencia de una fuerza atractiva implica que, a cierta temperatura baja, los átomos de helio 3 deben formar pares ligados similares a los pares de electrones en un superconductor y deben adquirir las propiedades de superfluidez correspondientes.

Aunque la teoría de apareamientos de la superconductividad pronosticaba que una fase superfluida del helio 3 debía existir, resultó ser extremadamente difícil hacer cálculos realistas de la temperatura a la que tal superfluido empezaría a aparecer. Las búsquedas experimentales de la superfluidez en el helio 3 dependían del desarrollo de nuevos métodos para lograr temperaturas más bajas. De hecho, algunos de los avances más importantes en las técnicas criogénicas a temperaturas ultrabajas fueron resultados colaterales de esta misma investigación. Cada vez que se descubrían nuevas técnicas de refrigeración, las temperaturas de transición pronosticadas resultaban ser teóricamente demasiado altas, y hacia la mitad de la década de 1960, cuando algunos de los cálculos más pesimistas indicaban que la superfluidez ocurría sólo en torno a una millonésima de grado sobre el cero absoluto, la búsqueda de la superfluidez cesó prácticamente.

Por fin, en 1971, pudo descubrirse la transición, y ello ocurrió durante una investigación (a alta presión) de las propiedades magnéticas del helio 3 sólido. El descubrimiento se obtuvo en la Cornell University, por parte de Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson y uno de nosotros (Lee). El helio 3 líquido se encontraba en el aparato experimental, pero sólo como un ingrediente técnico en un esquema de refrigeración. Este método, conocido como enfriamiento por compresión, se basa en el hecho de que cuando se comprime una mezcla de helio 3 sólido y líquido, parte del líquido se convierte en sólido, y la temperatura de la mezcla desciende. La transición superfluida en el helio 3 fue observada primeramente a la temperatura de 0,0027 grados sobre el cero absoluto, que es cerca de 1000 veces más fría que la temperatura de la transición superfluida del helio 4, y es también 1000 veces más alta que las predicciones teóricas más pesimistas adelantadas hacia mediados de la década de 1960.

En el experimento original de Cornell, el volumen de la celda que contenía el helio 3 sólido y líquido se iba reduciendo a un ritmo constante, mientras se registraba continuamente la presión



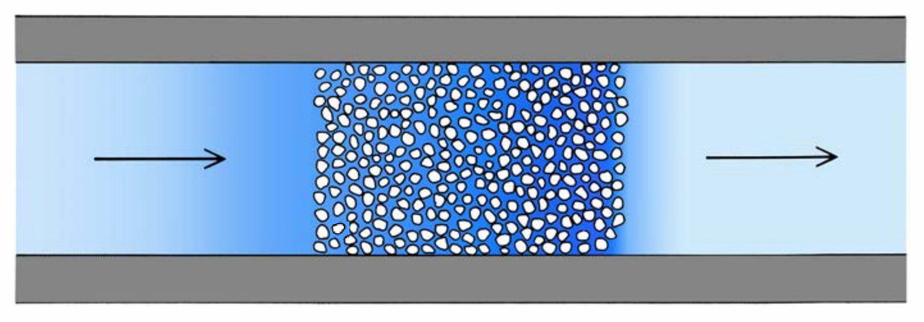
LA ESTRUCTURA DEL PAR en la fase A_1 del helio 3 es la más sencilla de describir de todas las estructuras de pares en las tres fases superfluidas del isótopo. Los imanes nucleares elementales, asociados al par de átomos, están orientados de manera que el magnetismo resultante del par se sitúe a lo largo de la dirección del campo magnético. Los miembros del par, en esta figura, giran uno en torno del otro en un plano que contiene al campo.

interior. La primera sospecha de la transición superfluida ocurrió al advertirse un ligero, y abrupto, cambio en el ritmo a que la presión aumentaba.

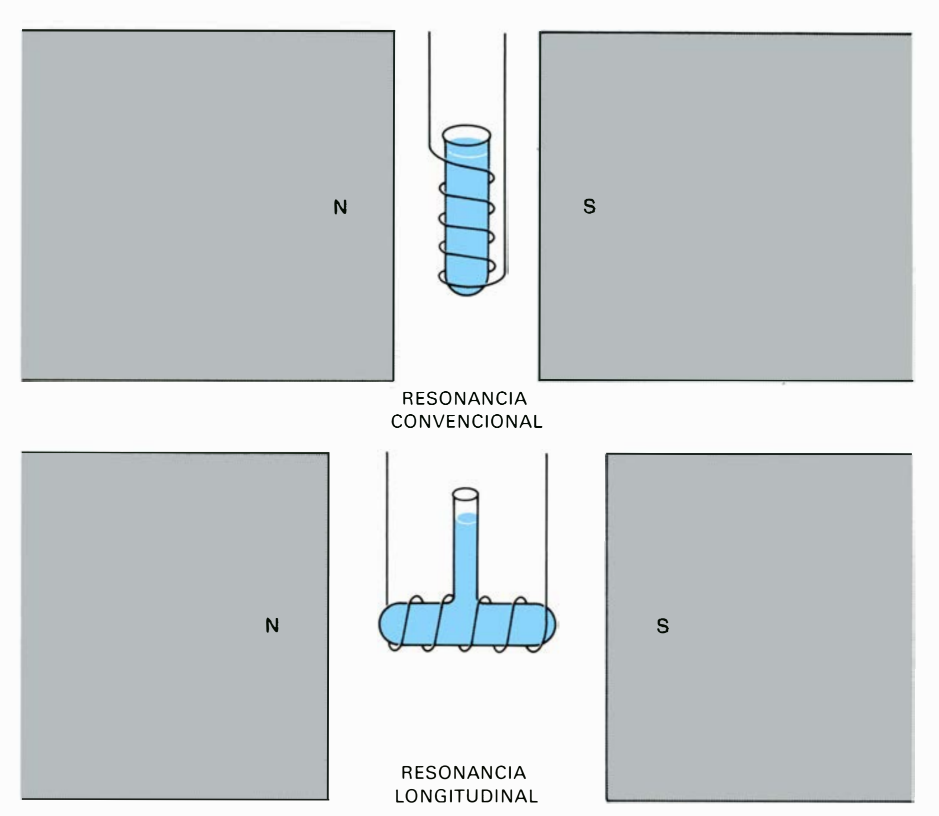
El cambio en el ritmo de presurización (incremento de la presión) del helio 3 era una anomalía intrigante. Al principio, se interpretó como señal de que la transición magnética predicha estaba teniendo lugar dentro del helio 3 sólido de la celda. Se buscó información adicional acerca del efecto, recurriendo a una técnica estándar en la investigación de fenómenos magnéticos: espectroscopia de resonancia nuclear magnética. Este procedimiento se funda en que la aplicación de un campo magnético externo conveniente puede ejercer una fuerza de giro sobre la orientación de un núcleo atómico magnético, de la misma manera que las fuerzas magnéticas pueden hacer girar la aguja de una brújula. Sin embargo, como todos los núcleos magnéticos también giran como giróscopos, responden a tales fuerzas de giro con el complicado movimiento de precesión característico de una peonza. Si el campo aplicado tiene la frecuencia adecuada, el movimiento inducido puede provocar la emisión de una señal de radiofrecuencia, de la cual pueden deducirse algunas características del magnetismo nuclear y del spin.

Líquidos de pares fermiónicos

Estas mediciones de resonancia magnética revelaron que la anomalía en la presión iba acompañada de un curioso cambio en las propiedades magnéticas: por debajo de la temperatura de la anomalía, se presenta un enorme desplazamiento en la frecuencia de la señal emitida por los núcleos de helio 3. Este desplazamiento resulta demasiado grande como para poder explicarse por ninguna teoría convencional de espectroscopia de resonancia. Además, se encontró que el desplazamiento no tenía lugar en la señal característica emitida por los átomos de helio 3 en la fase sólida: iba asociada, inequívocamente, a la señal proveniente del líquido.



EL FLUJO SIN FRICCION DEL HELIO 3 ofrece una prueba convincente de que las nuevas fases del líquido son realmente superfluidos. Se llena, compactamente, de polvo un tubo, de manera que sea casi imposible que el fluido fluya por encima de la transición superfluida. En la fase superfluida, sin embargo, parte del líquido fluye libremente por entre el polvo. En la práctica, el experimento se hace con una corriente oscilante de superfluido.



LA RESONANCIA NUCLEAR MAGNETICA se usa normalmente al analizar la respuesta de un sistema a una señal magnética emitida por un arrollamiento de radio frecuencia cuyo eje es perpendicular a un campo magnético estable aplicado. Cuando se estudia el helio 3 mediante esta técnica, muestra un desplazamiento de frecuencia que resulta demasiado grande para que pueda explicarse por las teorías de resonancia convencionales en sistemas normales. Los tipos de apareamiento que se cree que caracterizan a los superfluidos *A* y *B*, sin embargo, pueden producir un desplazamiento del tamaño observado. Las teorías de apareamiento también pronostican que las señales de resonancia nuclear magnética pueden observarse por arrollamiento orientado no perpendicular al campo estable, sino paralelo a él; así en las fases *A* y *B*.

El descubrimiento del extraño comportamiento del helio 3 líquido, independientemente de los detalles, se consideró casi unánimemente como prueba de la tan deseada fase superfluida. Algo más de un año después del descubrimiento, Anthony J. Leggett, de la Universidad de Sussex, construyó una teoría que explicaba las anomalías magnéticas observadas y predecía otros nuevos fenómenos magnéticos, muchos de los cuales se irían observando a partir de entonces. El trabajo de Leggett combinaba la teoría de la resonancia nuclear magnética con la teoría que describía el apareamiento de partículas en un líquido de fermiones eléctricamente neutro. Su éxito convenció a casi todo el mundo (excepto, durante un tiempo, al propio Leggett) de que los nuevos estados del helio 3 líquido eran realmente superfluidos, que estaban basados en el apareamiento de átomos de helio 3.

El posterior descubrimiento de manifestaciones no magnéticas más tradicionales de la superfluidez aparecieron en un clima de expectación decreciente. Las primeras señales de propiedades de flujo anormales fueron detectadas en 1973 en el laboratorio de Olli V. Lounasmaa, en la Universidad Politécnica de Helsinki. Una prueba más directa de propiedades superfluidas fue obtenida al año siguiente en el laboratorio de John C. Wheatley, en la Universidad de California en San Diego, y en el laboratorio de John D. Reppy, en Cornell. En estos experimentos, se operaba con una cámara tan repleta de material que los espacios intersticiales resultaban extremadamente pequeños. El helio 3 líquido, violentado dentro de los pequeños intersticios de la cámara, se encontraba completamente inmovilizado, por encima de la temperatura de transición. Sin embargo, por debajo de la temperatura de transición, se observó una señal patente de que el líquido circulaba libremente por la cámara. Sólo después de la publicación de estos experimentos, en 1974, se consagró el descubrimiento con la aparición de una nueva categoría referencial: "Helio 3 superfluido".

El más superfluido de los superfluidos

Desde su descubrimiento, se ha venido considerando al helio 3 superfluido como una sustancia más extraña todavía que el superfluido helio 4 o los superconductores. Ya los primeros experimentos revelaron, no una transición superfluida, sino dos. Estas tenían lugar a 0,0027 y 0,0021 grados K, cuando la presión era de 34 atmósferas. Las dos nuevas fases que aparecían cuando el líquido se enfría hasta esas temperaturas se denominaron ^{3}He-*A* y ^{3}He-*B*. Cuando el enfriamiento se hace en un campo magnético surge otra fase, la ^{3}He-A_1, en un corto intervalo de temperaturas entre la fase *A* y el líquido normal. Así, en una pequeña región del diagrama de fases, el helio 3 existe en cinco fases distintas: la sólida, la líquida normal y tres tipos de superfluidez. La multiplicidad de fases superfluidas distintas en el helio 3, así como otras propiedades distintas del líquido, lo ubican en un lugar diferente, no sólo de los líquidos ordinarios, sino también del helio 4 y de los superconductores.

Cuando se compara el helio 4 con nuestro conocimiento actual del helio 3 superfluido, el primero parece ser un superfluido bastante monótono. Al carecer los átomos de helio 4 de spin y de magnetismo, el superfluido que forman es magnéticamente inerte. Además, la estructura espacial del átomo de helio 4 no tiene especial interés: es una esfera perfecta, desprovista de cualquier característica notable y, por tanto, incapaz de privilegiar una dirección u orientación sobre otra cualquiera. A causa de su alto grado de simetría interna, el átomo de helio 4 es casi como las ficticias partículas puntuales de los manuales. Excepto bajo las condiciones extremas que logren arrancarlo de su forma simétrica, nada puede decirse de un átomo de helio 4, aparte del lugar que ocupa y la velocidad a que va. Esta ausencia de estructura interna en el átomo limita los tipos de fenómenos que pueden darse en la fase superfluida; el único comportamiento mecánico-cuántico que se revela a escala macroscópica en el helio 4 superfluido es el relacionado con el movimiento de la materia de un lugar a otro.

En principio, un superconductor puede ser un superfluido más interesante, ya que los electrones tienen spin y el magnetismo correspondiente. En todos los superconductores conocidos, sin embargo, los dos electrones del par están orientados con sus polos magnéticos situados en direcciones opuestas. Como resultado, los campos magnéticos de los electrones se cancelan y los pares son tan inertes magnéticamente como los átomos de helio 4. Además, al igual que los átomos de helio 4, los pares de electrones que se hallan en todos los superconductores conocidos están tan desprovistos de

estructura como la nube electrónica esférica que envuelve al átomo de helio.

El helio 3 es el único superfluido en el que los objetos condensados tienen estructura interna. Una razón profunda en pro de esta estructura es que, en el helio 3, los polos magnéticos nucleares de los dos átomos que forman el par se hallan alineados en la misma dirección. En vez de cancelarse uno con otro, los campos se refuerzan, de manera que los propios pares son magnéticos.

El que los núcleos de helio 3 puedan aparearse de esta manera fue pronosticado con una anticipación en más de diez años antes de descubrirse las fases superfluidas, aunque fue imposible predecir con seguridad si los átomos preferirían la configuración magnética o la no magnética. Que el apareamiento tiene lugar en el más interesante modo magnético se estableció por las mediciones de resonancia nuclear magnética realizadas muy pronto después del descubrimiento. Los efectos de resonancia magnética podían explicarse perfectamente en términos de la precesión de los ejes que caracterizaban la orientación magnética del par. Además, la existencia de más de una fase superfluida se deducía de leyes cuánticas generales, que especifican las distintas configuraciones posibles (o estados cuánticos) alcanzables para un objeto formado por dos fermiones con polos magnéticos dirigidos similarmente.

El magnetismo neto de los pares en el helio 3 comporta nuevas consecuencias. Como los imanes nucleares de ambos miembros del par están dirigidos similarmente, los pares en el helio 3 superfluido no pueden tener la simetría característica de los pares de electrones en un superconductor. Si los dos átomos estuvieran distribuidos en torno al centro de masas con simetría esférica perfecta, serían el mismo en todos los aspectos, violando la regla de que dos fermiones no pueden ocupar justamente el mismo estado. (Los electrones que forman los pares no magnéticos en un superconductor pueden moverse uno en torno a otro con simetría esférica perfecta, toda vez que sus imanes internos están en direcciones opuestas, cumpliendo por tanto la exigencia de que dos fermiones no son análogos en todos los aspectos.)

Las distintas fases superfluidas del helio 3 pueden caracterizarse detalladamente en términos de esta estructura interna de los pares condensados. La fase más simple es la fase A_1, que existe sólo en un estrecho intervalo de temperaturas, exactamente debajo de la temperatura de transición, cuando el fluido se expone a un campo magnético. Los spines nucleares y los ejes magnéticos de todos los pares en la fase A_1 están alineados uno respecto al otro y en relación con el campo externo. (Se desconoce si están en la misma dirección del campo o en dirección opuesta.) Además, los dos miembros de cada par giran uno en torno al otro en un plano paralelo al campo aplicado.

Las fases A y B, que no precisan de un campo externo para estabilizarse, se relacionan con otros tipos de movimiento más complicados. Tanto el eje magnético del par como el eje asociado con su forma asimétrica pueden orientarse de tres maneras distintas, determinadas por leyes cuánticas bien establecidas. Las fases A y B están caracterizadas por varias combinaciones, o "superposiciones", de estas configuraciones, cuyas descripciones mecánico-cuánticas desafían cualquier traducción a un lenguaje clásico.

Otras propiedades

A causa de la estructura interna de los pares, el helio 3 superfluido tiene muchas propiedades interesantes que no se observan en otros superfluidos. Un ejemplo de ello es la anisotropía del helio 3 superfluido. Puesto que todos los pares de átomos en el superfluido se hallan en el mismo estado, su forma asimétrica se expresa en las propiedades del fluido como un todo. Si se define una dirección por la aplicación de un campo magnético, se encuentra que muchas propiedades del fluido dependen de la dirección con respecto al campo. Por ejemplo, el ritmo de atenuación del sonido en el líquido y el ritmo de flujo superfluido dependen de que se midan en direcciones paralelas al campo o en direcciones perpendiculares a él. La dependencia de las propiedades mecánicas en la dirección de un campo magnético aplicado se observa corrientemente en muchos sólidos. También se observan anisotropías similares en los líquidos esotéricos que se conocen como cristales líquidos. Lo que hace único al helio 3 superfluido es que, en todos los otros casos, el campo externo interacciona directamente con los electrones de los átomos que constituyen el medio. Estos electrones, a su vez, son los responsables directos de las propiedades mecánicas que son afectadas por el campo. En el helio 3, sin embargo, el campo magnético interacciona sólo con los diminutos imanes nucleares enterrados profundamente en el interior de los átomos. El que una alteración de la dirección de los imanes nucleares pueda repercutir en algo tan aparatoso como la atenuación del sonido no se había oído nunca antes del descubrimiento del helio 3 superfluido. Ello es una manifestación directa de las delicadas correlaciones, dentro de cada par, de los dos ejes que describen el magnetismo y la asimetría espacial.

Los efectos cuánticos macroscópicos más intensamente estudiados en el helio 3 son los asociados directamente con el magnetismo nuclear. Las señales emitidas debido a la estimulación magnética de las fases superfluidas apenas guardan relación con los esquemas obtenidos con cualquier otra sustancia. Hemos mencionado ya el desplazamiento anormalmente grande en la señal de resonancia magnética, observado en los primeros experimentos. Cada una de las tres fases tiene su propio esquema característico de desplazamientos, algunos de los cuales (llamados resonancias longitudinales) provienen de configuraciones en que la teoría convencional de resonancia no prevé ninguna señal. El más impresionante de estos efectos longitudinales, quizás, aparece cuando se cambia bruscamente la intensidad de un campo magnético estático aplicado. Si tal ocurre con materiales ordinarios, la magnetización inducida de todo el material sigue el cambio algo lentamente, tendiendo despacio al nuevo valor apropiado a la nueva intensidad de campo. En el helio 3 superfluido, el magnetismo responde a dicho cambio de una manera vivamente oscilante.

Otra previsión, todavía por comprobar, es que la configuración más estable de la fase A en un recipiente estacionario será aquella en que el líquido gire sin cesar. Los superconductores y el helio 4 superfluido tienen estados similares, pero nunca son los estados más estables y, en principio, pueden decaer en configuraciones que no giren.

Estos ejemplos sólo son fragmentos de la lista creciente de propiedades observadas y pronosticadas de las nuevas fases superfluidas del helio 3. Estos nuevos superfluidos han despertado un gran interés entre los físicos, debido en parte a las oportunidades que ofrecen de ver trabajar la mecánica cuántica, por decirlo así, en un tubo de ensayo. Al presentar modos de comportamiento superfluido sustancialmente más generales que ninguno de los disponibles por el helio 4 o por los superconductores, se obliga a los físicos de bajas temperaturas a reexaminar y extender las teorías desarrolladas, a lo largo de 50 años, para explicar el comportamiento de los superfluidos anteriores a 1971. Estos procesos pueden revelarnos lo mejor de la física.

Ciencia y sociedad

Energía nuclear (y 5)

Según las últimas estadísticas preparadas por el Atomic Industrial Forum, hay 19 países en el mundo que utilizan actualmente energía nuclear para la generación de electricidad. El número total de reactores es de 172 y la capacidad conjunta de 77.836 megavatios de electricidad.

El número de países que tienen en marcha planes para instalar reactores nucleares es muy superior. En la actualidad, son 41 países, que proyectan instalar en total 454 reactores con una capacidad conjunta de cerca de 600.000 megavatios. Estas cifras, que se refieren a los pedidos hechos hasta mediados de 1976, representan un 17 % de aumento sobre los pedidos pasados en 1975 y más del 56 % sobre los de 1974. Los Estados Unidos proyectan un total de 228 reactores con una capacidad de 226.189 megavatios; Francia 47, con 39.545 megavatios y, entre los restantes países con importantes capacidades proyectadas para el futuro, se encuentran: España (35.845 megavatios), República Federal de Alemania (28.683 megavatios), Irán (27.200 megavatios), Italia (21.386 megavatios) y Japón (20.002 megavatios).

Quiere ello decir que, cuando en algunos de estos países, especialmente Estados Unidos e Inglaterra, se ha producido el debate público, que actualmente se desarrolla con intensidad, sobre lo que debe y no debe hacerse en el campo de la energía nuclear, ya existen instalaciones nucleares de considerable importancia, aunque su contribución al suministro energético de cada país sea muy reducida, sin llegar en ningún caso al 20 %. Por ello, el debate se está centrando sobre todo en la autorización o denegación de los permisos para poner en funcionamiento las plantas de reprocesado de los desechos radiactivos que las actuales instalaciones producen, plantas que resultan un elemento imprescindible para cerrar el ciclo de la energía nuclear desde diversos puntos de vista, y en el tipo de reactores que deben utilizarse. En este mismo número se inserta un artículo sobre este particular que expone ampliamente la situación actual y los problemas implicados.

La energía nuclear se ha convertido en un tema político que ha jugado un papel en las últimas elecciones celebradas en Suecia y en los Estados Unidos de América y que está sometido a debates parlamentarios y a acaloradas discusiones públicas en países como Inglaterra, Australia y Austria. En Inglaterra, Suecia y Australia se han nombrado comisiones encargadas de estudiar los diversos aspectos del tema, que están dando a la luz informes en los que recogen sus conclusiones. En general, ninguno de ellos se opone a la minería del uranio ni a la autorización de los reactores actualmente existentes. Las dudas y las cautelas comienzan siempre al tratar el tema de cuáles sean las directrices que deban seguirse sobre el reprocesamiento, así como sobre el grado en que deba favorecerse o frenarse la instalación de nuevas plantas. Se comprenden estas incertidumbres si se tiene en cuenta que para llegar a una conclusión sobre cada uno de estos puntos hay que evaluar cuidadosamente magnitudes de muy distinta naturaleza: las puramente tecnológicas (afectadas por las indeterminaciones de técnicas que todavía están en fase de diseño) y otras: económicas, sociales, de política interior, de política internacional, éticas y ambientales (que no ha faltado quien considere como exigencias fundamentalmente estéticas). En ninguno de estos planos faltan razones en pro y en contra de las diversas posiciones. No deja de ser curioso que organizaciones sindicales en Inglaterra y en Australia hayan estado de acuerdo con los planes industriales para desarrollar la industria nuclear, en contra de los grupos ambientalistas, o que las autoridades regionales de Cumbria, Inglaterra, a las que pertenece la decisión sobre la planta de reprocesamiento de Windscale, se hayan mostrado favorables a ella en un ambiente de opinión pública positivo. Quizá la prueba más decisiva a que se hayan sometido hasta ahora los aspectos políticos de la cuestión hayan sido las votaciones que con carácter de referéndum se han realizado en 7 estados de Norteamérica: en California, en el mes de junio pasado, y en Arizona, Colorado, Montana, Ohio, Oregón y Washington, con motivo de la votación para la elección presidencial. En todos los casos, la propuesta de someter a fuertes restricciones el desarrollo, operación y utilización de las plantas nucleares, fue derrotada por amplios márgenes, que en muchos casos alcanzaron el 2 a 1.

Si la energía nuclear se ha convertido en un tema de tanta actualidad e interés público en muchos países es porque sirve como foco catalizador de tres preocupaciones básicas contemporáneas, que son: la relacionada con el modelo de desarrollo practicado por el mundo occidental en los últimos años y las consecuencias que acarreará en el futuro; el problema de la crisis energética a nivel mundial y la preocupación por el mantenimiento de la calidad del medio ambiente. Todos estos aspectos se interrelacionan estrechamente y conllevan tomas de posición muy arraigadas y discusiones en las que se mezclan los argumentos racionales con fuertes cargas de emotividad. Su complejidad no facilita el que por medio de la discusión pública puedan alcanzarse soluciones que sean no sólo claras y definitivas, sino tan rápidas como requieren las decisiones a tomar. Son las sociedades nacionales y, en último término la sociedad mundial, las que están decidiendo en estos momentos si avanzan o no por una vía que está llena de grandes promesas de bienestar y de terribles peligros generales y de difícil remedio una vez que se produzcan. Las mentes más serenas coinciden en que, con independencia de que se adopte una solución moderada acerca de la utilización de la energía nuclear, es imprescindible poner en marcha desde ahora programas nacionales de ahorro energético, limitando cuanto se pueda el crecimiento continuado del consumo que se experimentó en las dos últimas décadas.

En su último informe sectorial, la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) recomendó vivamente que se incrementaran todavía más las restricciones energéticas. Se apoyaba en su recomendación en el estudio aportado por la Agencia Internacional de la Energía. Esta oficina ha proyectado modelos de situación límite sobre qué ocurriría ante un embargo del petróleo o un conflicto armado.

Para bien o para mal, los datos de que hasta ahora disponemos sobre la decisión de los ciudadanos cuando tienen que tomar una posición concreta y comprometida sobre el particular, muestran que la balanza se inclina a favor de la conti-

nuación del consumo y de la economía del bienestar, confiando quizá en que los problemas de la energía y del medio ambiente se solucionarán de paso. Las encuestas de opinión previas a las elecciones suelen manifestar, por el contrario, una actitud más favorable a las posiciones austeras y restrictivas de los ambientalistas y oponentes a la sociedad de consumo.

El problema de la energía nuclear nos lleva de la mano a otros de carácter científico o técnico que tengan una incidencia directa en la vida social. Tales son, por ejemplo, la investigación bioquímica, la manipulación genética, la reorganización del ambiente, la destrucción del ozono, etcétera. Temas que, forzosamente, obligan a la propia sociedad a tomar cartas en el asunto y, por ello mismo, a la discusión de quién debe regir la investigación: el científico o el político. En todo caso, siempre será necesario documentarse bien y no dejarse llevar por emociones sentimentalistas o dramatismos injustificados. Falta todavía quien se decida a ir más en vanguardia, quien se decida por crear los métodos de aprovechamiento del calor residual, la bestia negra que asusta a todos los ambientalistas para bien de nuevos sistemas biológicos y potenciamiento de otros.

Manos sudorosas

Existe un procedimiento poco usual de obtener imágenes fotográficas conocido como "fotografía Kirlian". El nombre deriva del técnico ruso en electricidad Semyon D. Kirlian que, junto con su esposa Valentina, lo experimentó y desarrolló. Consiste fundamentalmente en que se coloca un objeto orgánico, generalmente la mano del experimentador, sobre una placa de emulsión fotográfica. El objeto se conecta a una fuente de alta tensión de características especiales y debajo de la película se sitúa el segundo electrodo del circuito. Cuando el generador eléctrico se pone en marcha, se produce una imagen fotográfica sorprendente y espectacular, en la que aparecen como unos efluvios o aureolas emanando del contorno del objeto utilizado.

La práctica de este experimento ha adquirido bastante difusión y atención en los últimos tiempos porque ha sido utilizado por parapsicólogos y practicantes de las ciencias ocultas como prueba científica de que las variaciones en la estructura y el color de tales imágenes fotográficas están relacionadas de algún modo con cambios en los estados fisiológicos, psicológicos, o "psíquicos" del sujeto.

Para someter a prueba estas pretensiones pseudocientíficas, un conjunto de investigadores de diversas disciplinas han estado llevando a cabo una serie exhaustiva de experimentos sobre la técnica de Kirlian "para determinar en qué medida la modulación observada en la imagen puede explicarse por procesos de descarga gaseosa y si hay o no otros procesos que contribuyan a la imagen resultante". Parece que la fuente de energía que contribuye fundamentalmente a la formación de la imagen es una descarga en corona, débil corriente que se produce por la ionización de la atmósfera cuando los campos eléctricos alcanzan niveles cercanos al límite en el que saltan chispas.

Este estudio se ha llevado a cabo patrocinado por la Advanced Research Projects Agency del Departamento de Defensa norteamericano, con tres investigadores principales, John O. Pehek y David L. Faust que trabajan ambos en el Departamento de Física y Ciencia Atmosférica de la Universidad de Drexel, y Harry J. Kyler, psicólogo de la Universidad de Villanova, los cuales resumen en la revista *Science* los principales resultados de su labor. La conclusión general del estudio es que "el condicionamiento principal del color y la forma de las fotografías Kirlian de sujetos humanos" es la humedad, consecuencia probablemente del sudor de las palmas de las manos.

Pehek, Faust y Kyler manifiestan que "las imágenes fotográficas, obtenidas mediante la técnica de Kirlian, registran fundamentalmente la actividad de corona durante el tiempo de exposición. La mayor parte de las variaciones producidas en las imágenes de la corona de un objeto vivo que esté en contacto con la película fotográfica pueden explicarse por la presencia de humedad en la superficie del objeto. Durante la exposición, la humedad pasa del objeto a la emulsión de la película fotográfica y origina una modificación de la estructura de la carga eléctrica sobre la película y con ello también del campo eléctrico sobre la superficie del objeto. Como resultado de todo ello, pueden producirse grandes variaciones en la densidad de las imágenes de corona, de la trayectoria de sus flujos y de su coloración".

Estos investigadores proponen que esta técnica, a la que prefieren llamar fotografía de descarga en corona, puede resultar útil en el futuro para "detectar y medir la humedad en muestras animadas e inanimadas a través de la modulación regular de la imagen debida a los diversos niveles de humedad".

El teléfono óptico

Un cambio radical que parece probable se consiga, dentro de pocos años, en la tecnología telefónica comporta la transmisión de mensajes por onda de luz, en vez de aprovechar las ondas eléctricas o de radio. La razón estriba en que la cantidad de información que puede acarrear un canal de comunicación, verbigracia, un par de cables telefónicos, aumenta con la frecuencia de la señal. La frecuencia de las ondas lumínicas es, aproximadamente, unas mil veces la frecuencia de las más cortas de las ondas de radio. Los Bell Laboratories, de la Western Electric Company, estadounidenses, están llevando a cabo las primeras pruebas sostenidas de un arquetipo de sistema mediante ondas lumínicas en su planta de experimentación conjunta de Atlanta. Los resultados obtenidos hasta el presente permiten abrigar la esperanza de que la comunicación a través de ondas de luz se llegará a utilizar extensamente en zonas metropolitanas hacia los primeros años de la próxima década.

El sistema arquetípico tiene como fuente de luz un láser de arseniuro de galio aluminio que se enciende y se apaga con una frecuencia de 44,7 millones de veces por segundo mediante un circuito modulador. Las señales viajan un total de 70 kilómetros en movimiento de vaivén en un cable de 640 metros, que contiene 144 fibras ópticas, filamentos de vidrio muy finos construidos con sílice dopada. Los filamentos poseen una transparencia extraordinaria, necesaria para evitar pérdidas excesivas de la señal con la distancia. El experimento reveló que los filamentos podrían transportar una señal a lo largo de más de 6 kilómetros sin que fuera menester regenerar las vibraciones de la luz con un repetidor. En el extremo receptor del cable, se detecta la señal a través de un pequeño fotodetector, que convierte los pulsos de luz en señales eléctricas, las cuales son compatibles con el equipo telefónico habitual.

Un cable del tamaño proyectado para el sistema arquetípico podría transmitir unos 50 000 mensajes a la vez (672 en cada par de fibras ópticas). La primera aplicación prevista por la Bell System, para comunicaciones ópticas, es la transmisión de información entre sistemas de acoplamiento telefónico en áreas metropolitanas, en las cuales existe limitación de espacio para los conductos subterráneos, y en las cuales la mayor parte de la información transmitida se hace en forma digital o pulsada.

El control de la marcha

Experimentos recientes indican que el mecanismo, mediante el cual el sistema nervioso genera los movimientos rítmicos de las extremidades durante la marcha, es fundamentalmente el mismo en animales tan dispares como el gato y la cucaracha

Keir Pearson

El análisis científico de la marcha comenzó hace un poco más de 100 años, como resultado de la viejísima disputa sobre si los cuatro cascos de un caballo a galope estaban en algún momento levantados del suelo al mismo tiempo. En un esfuerzo por resolver el problema, el pionero de la fotografía animada, Eadweard Muybridge, montó en 1872 una serie de cámaras conectadas eléctricamente y consiguió obtener una secuencia rápida de fotografías de un caballo a galope en una pista californiana. Reproducciones de las fotografías que mostraban los cuatro cascos del caballo separados del suelo aparecieron en muchas publicaciones, incluida la edición de *Scientific American* correspondiente al 19 de octubre de 1878. La claridad de estas primeras fotografías suscitó pronto en Muybridge la idea de que esta técnica fotográfica podía extenderse asimismo al análisis de la marcha de cualquier animal con un detalle sin precedentes. Posteriormente, fotografió gran cantidad de animales caminando y corriendo, verbigracia, gatos, perros, monos, camellos, elefantes, mapaches, cerdos, canguros y aves. Su valiosa colección de fotografías terminaría publicándose en 1887 en una monumental obra de 11 volúmenes titulada *Animal Locomotion.*

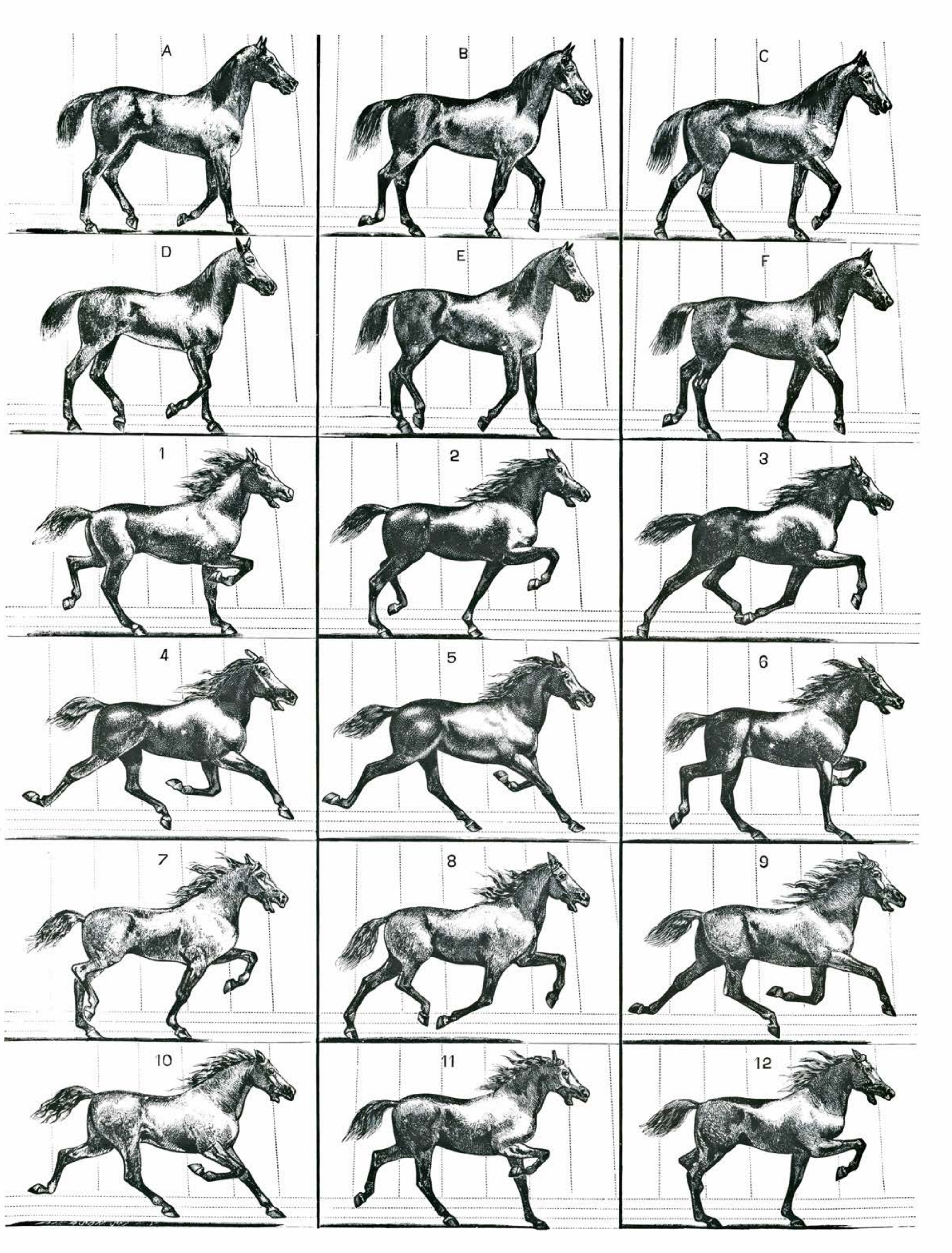
¿Cómo genera el sistema nervioso de un animal los movimientos rítmicos de marcha de la pata, con tanto detalle recogidos por Muybridge? Los intentos de dar respuesta a esta pregunta comenzaron a principios de siglo con el trabajo de dos fisiólogos británicos, C. S. Sherrington y T. Graham Brown. Sherrington mostró primero que podían provocarse movimientos rítmicos en las extremidades posteriores de gatos y perros algunas semanas después que se les hubiera seccionado la médula espinal. Dado que la operación había aislado los centros nerviosos que controlan el movimiento de las extremidades posteriores respecto del resto del sistema nervioso, dedujeron que los niveles altos del sistema nervioso no eran necesarios para la organización de los movimientos de la marcha.

Otro notable descubrimiento de este período, aunque no obtuvo el reconocimiento general hasta muy recientemente, fue la demostración de Graham Brown, en 1911, de que las contracciones rítmicas de los músculos de la pata, similares a las que tienen lugar durante la marcha, podrían ser inducidas inmediatamente después de la desmedulación, incluso en aquellos animales en los que se había eliminado la información procedente de los nervios sensoriales de las patas. El descubrimiento llevó a Graham Brown a proponer que los mecanismos alojados enteramente dentro de la médula espinal eran los responsables de la generación del ritmo básico del paso en cada pata.

Antes, Sherrington había insistido en la importancia de la información sensorial de los receptores nerviosos periféricos para el inicio y coordinación de tales movimientos; explicó la generación de los movimientos rítmicos de las patas por medio de una serie de "reflejos en cadena" (entendiendo por reflejo un movimiento estereotipado provocado por la estimulación de un grupo específico de receptores sensoriales). De esta forma, pensó que la información sensorial generada durante cualquier parte del ciclo de la marcha desencadenaba la fase siguiente del ciclo mediante una acción refleja, produciendo a su vez otra señal sensorial que desencadenaba la parte siguiente del ciclo, y así sucesivamente.

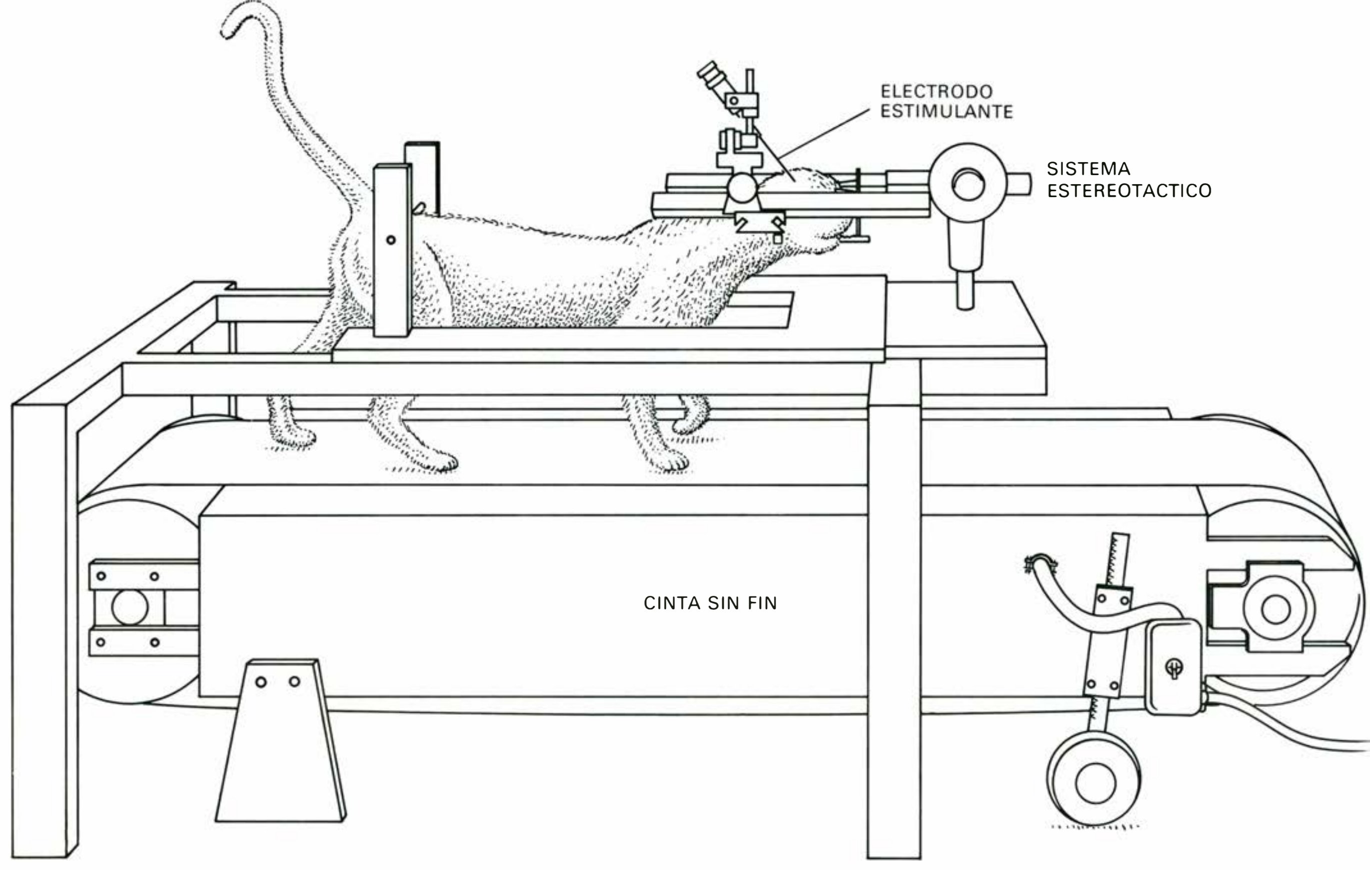
Los dos conceptos, de un generador del ritmo espinal para cada pata y del desencadenamiento de los movimientos de la pata mediante señales sensoriales, no son incompatibles. Ahora bien, Graham Brown consideraba que los reflejos reforzaban el ritmo generado desde el centro, un punto de vista que más tarde Sherrington compartió. En 1924 Sherrington escribía: "De las ob-

LOS PRIMEROS ESTUDIOS sobre la marcha y la carrera del caballo se recogen en la ilustración de la página siguiente. Se confeccionó a partir de dos rápidas secuencias de fotografías, obtenidas por el fotógrafo del siglo XIX Eadweard Muybridge, con la ayuda de una serie de cámaras conectadas eléctricamente; la ilustración es una reproducción de la primera página de SCIENTIFIC AMERICAN, del 19 de octubre de 1878. El artículo que acompañaba a la ilustración, titulado "El movimiento del caballo determinado científicamente", señala que estas dos series de "fotografías instantáneas", expuestas por Muybridge tras la publicación en la revista de una breve nota sobre sus experimentos en California, muestran "el movimiento del caballo 'Abe Edgington', al caminar...; la segunda muestra el mismo caballo al trote... La exposición para cada negativo fue de dos milésimas de segundo. Las líneas verticales del fondo están separadas por unos setenta centímetros; la línea horizontal de trazo grueso representa el nivel de la pista; las otras rayas horizontales punteadas, alturas de diez, veinte y treinta centímetros respectivamente... Obsérvese que, durante la marcha, el caballo tiene siempre dos cascos sobre el suelo y, por un breve intervalo en cada zancada, tres cascos. Las posiciones de los cascos que se muestran en las figs. A y E indican una zancada de ciento treinta centímetros. Al trote, la zancada del mismo caballo alcanza unos cinco metros y medio. Las figuras 1 a la 12 muestran este último tipo de locomoción. En las figuras 4 y 5, y de nuevo en las 9 y 10, el caballo está enteramente levantado del suelo, flotando literalmente en el aire... El menos atento de los observadores de estas figuras se dará cuenta de que la figura convencional de un caballo al trote no aparece en ninguna de ellas, ni nada que se le parezca. Antes de que estas fotografías fueran tomadas, ningún artista se hubiera atrevido a dibujar un caballo tal cual es en movimiento, incluso si hubiera sido posible detectarlo a simple vista en su actitud real... Los ingeniosos esfuerzos de Muybridge, que se vieron coronados por el éxito, lograron captar y fijar la ligereza de las posiciones de los animales en movimiento; con ello no sólo se aportó mayor luz a nuestro bagaje de conocimientos, sino que también produjo un cambio radical en el arte de representar el movimiento de los équidos."

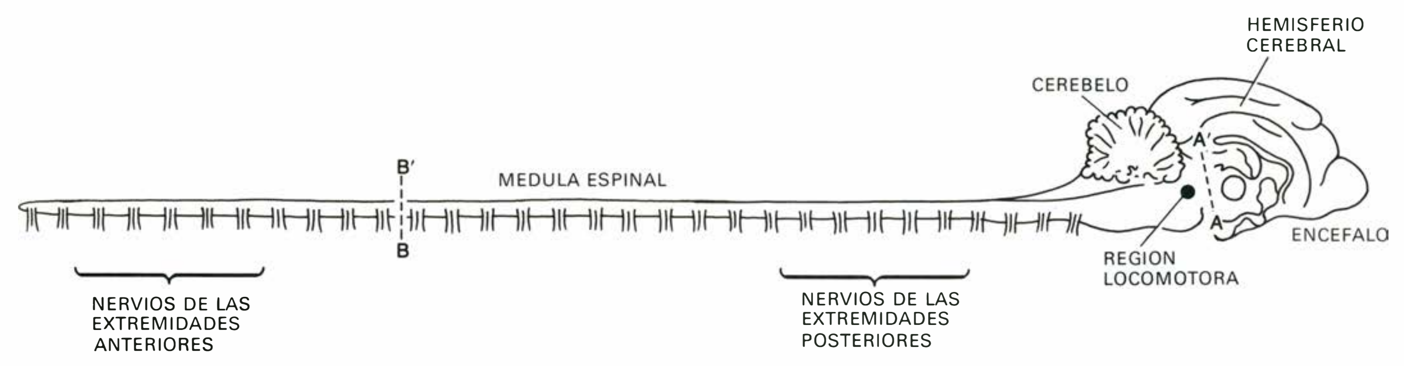

A
B
C
D
E
F
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

servaciones del Profesor Graham Brown se deduce que una actividad intrínseca en los centros espinales parece ser el mecanismo nervioso esencial responsable de la marcha inconsciente, una actividad central comparable con la del centro respiratorio en el bulbo y, al igual que este último, muy regulable mediante acción refleja". Experimentos recientes en varios laboratorios han producido resultados que sostienen plenamente esta visión dual del mecanismo nervioso implicado en la marcha.

Durante casi 40 años, y tras las investigaciones de Sherrington y de Graham Brown, no se han registrado avances significativos en nuestra comprensión de cómo el sistema nervioso controla la marcha. El mayor interés de la investigación en este intervalo se centró en la determinación de la organización y las propiedades de los reflejos espinales. En líneas generales, se ha trabajado muy poco por relacionar estos hallazgos con el comportamiento normal del animal. La investigación contemporánea sobre el control de la marcha empezó por los años 60, con el registro de los tipos de actividad muscular, en un gato que cami-



DISPOSICION EXPERIMENTAL empleada en el laboratorio del autor, en la Universidad de Alberta, para estudiar el control nervioso de la marcha en el gato; se adoptó a partir de un método desarrollado unos diez años antes por otro equipo de investigadores de la URSS. Primero se anestesia al animal y se le extirpan las regiones superiores del sistema nervioso una vez seccionado el bulbo raquídeo *(véase la ilustración inferior).* Subsecuentemente a esta operación, el animal queda en estado vegetativo, persistiendo únicamente los movimientos asociados con la respiración. Mediante estímulo eléctrico de la región locomotora de la porción restante del bulbo, puede conseguirse que el gato ande con normalidad cuando lo hace sobre una cinta sin fin. La velocidad puede controlarse completamente por el experimentador variando la velocidad de la cinta y la intensidad del estímulo. Debido a que el animal camina en una posición fija, esta disposición, utilizada ahora en una serie de laboratorios, permite registrar la actividad eléctrica de las células nerviosas en la médula espinal, bulbo y cerebelo.



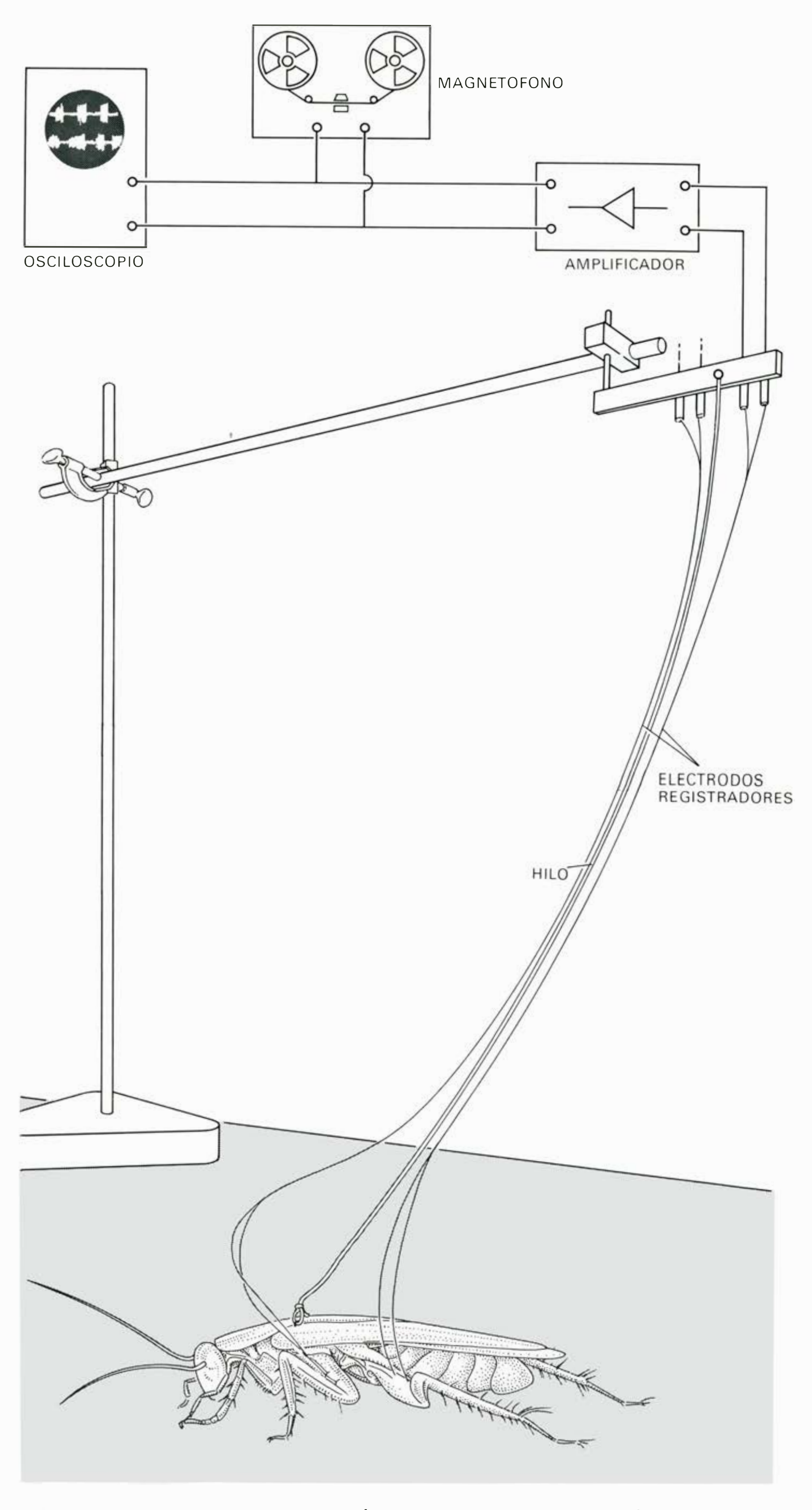
LA MEDULA ESPINAL Y EL BULBO INFERIOR están aislados de los hemisferios cerebrales y de la parte superior del bulbo del gato por haberse cortado la parte superior del bulbo siguiendo la línea marcada *A-A'* en este diagrama transversal del sistema nervioso central del gato. En un enfoque experimental distinto, desarrollado a principios de siglo por C.S. Sherrington, los segmentos de las extremidades posteriores de la médula espinal están aislados por quedar seccionada la médula por la línea *B-B'* del diagrama. En este último caso las extremidades posteriores se moverán sobre una cinta corredera inmediatamente después de la operación, si se trata al animal con ciertas drogas. Sin este tratamiento, se necesita un período de convalecencia para que las extremidades posteriores vuelvan a moverse.

naba libremente, por Ingmar Engberg y Anders Lundberg, en Suecia.

En 1965, los científicos soviéticos M. L. Shik, F. V. Severin y G. N. Orlovskii llevaron a cabo otro interesante descubrimiento: a los gatos que perdían los niveles superiores del sistema nervioso (los hemisferios cerebrales y la parte superior del bulbo) se les podía hacer caminar, de una manera controlada, sobre una cinta corredera. Una vez seccionada la parte superior del bulbo del gato, extraído el encéfalo, la estimulación eléctrica de la región locomotora en la parte restante del bulbo puede motivar que el animal ande cuando se le coloca sobre una cinta corredera. Los movimientos de marcha sobre dicha cinta son similares en todos los aspectos a los observados durante la marcha normal; el tipo de paso que el animal adopta depende de la velocidad de la cinta corredera y de la intensidad de la corriente estimuladora. El animal puede caminar a una velocidad baja de la cinta corredera ante un estímulo débil. Un incremento en la velocidad y en la intensidad del estímulo llegará a provocar el trote del animal; y potenciando todavía más la velocidad de la cinta corredera y la intensidad del estímulo, el animal llegará a galopar (a la carrera).

Por consiguiente, los distintos tipos de marcha del animal pueden controlarse completamente por la persona que realiza el experimento. La gran ventaja de esta disposición experimental es que permite registrar la actividad eléctrica de las neuronas dentro del sistema nervioso mientras anda el animal, puesto que éste se halla fijo en una posición espacial determinada.

A lo largo de este siglo han proliferado también numerosos estudios sobre el control nervioso de la marcha en anfibios (sapos y salamandras) y artrópodos (insectos, cangrejos de mar y de río). La mayoría de los trabajos realizados con estos animales ocurrieron en un momento en que el concepto dominante en neurofisiología era deudor de las investigaciones de Sherrington e I.P. Pavlov; tal idea era la siguiente: los reflejos constituían las unidades básicas del comportamiento. No hay, pues, porqué sorprenderse si las primeras hipótesis sobre el control de la marcha en anfibios e insectos sostenían que los reflejos eran esenciales para la generación del ritmo al andar. Muy recientemente, sin embargo, se han recabado pruebas sustanciales que demuestran la incorrección de ese postulado; se ha puesto de manifiesto que el ritmo básico se genera dentro del sistema nervioso central y



LA ACTIVIDAD ELECTRICA de los músculos de la pata de una cucaracha que camina libremente queda registrada mediante el aparato de la figura, diseñado por el autor y sus colaboradores. Se implantan unos hilos registradores en los músculos flexores y extensores de la pata del insecto; se fijan a la pata por la cutícula (el duro esqueleto externo). Los hilos registradores y el cable sujetador están unidos a una terminal fija colocada por encima de la cucaracha, cuyas longitudes se ajustan con el fin de que el animal pueda caminar libremente en un área de experimentación de medio metro de diámetro, aproximadamente.

LH RH LF RF

L3 L2 L1 R3 R2 R1

MARCHA

LH LF RH RF

TROTE

LH LF RH RF

PASO RAPIDO

LH LF RH RF

CARRERA

LH LF RH RF

TIEMPO ⟶

MARCHA A PASO NORMAL

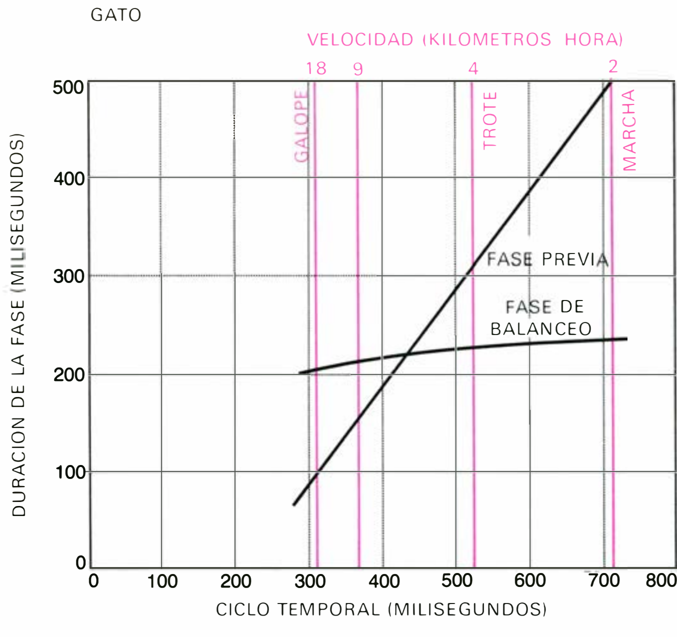
L3 L2 L1 R3 R2 R1

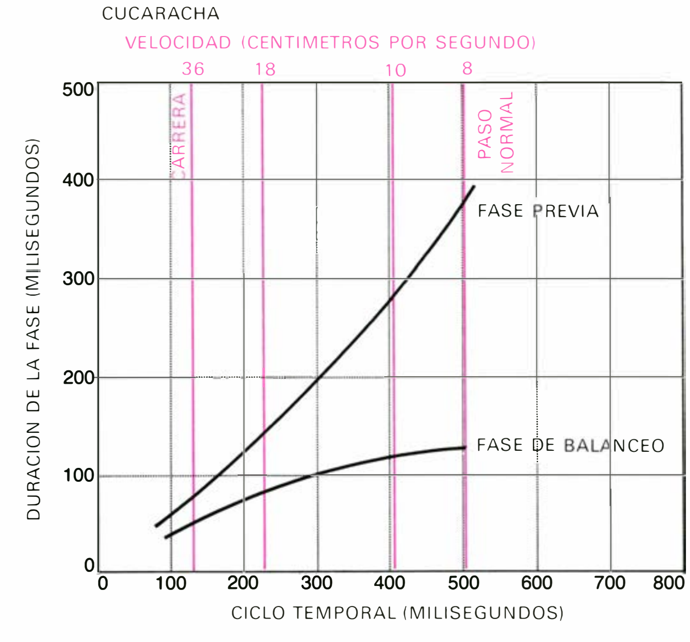
MARCHA/CARRERA (MARCHA TRIPEDA)

L3 L2 L1 R1 R2 R3

TIEMPO ⟶

LOS TIPOS DE MOVIMIENTO del gato y de la cucaracha se representan esquemáticamente en estos diagramas. De izquierda a derecha, cada barra horizontal indica, para cada pata, el tiempo durante el cual el pie no se apoya en el suelo *(espacios blancos de la barra)* **o sí se apoya** *(espacios grises).* **Durante la marcha lenta, hay una secuencia de pasos en los dos animales,** *(elipses coloreados).*

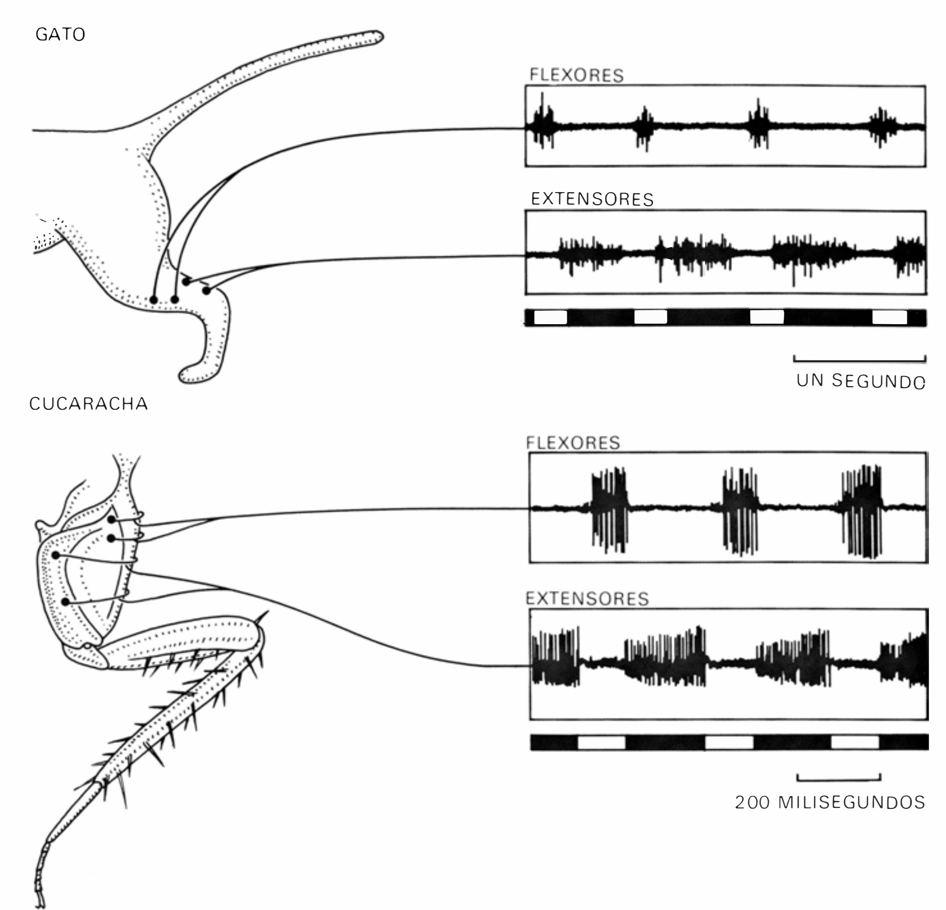




DURANTE LA MARCHA NORMAL el tiempo que ocupa la fase de balanceo (cuando no se apoya el pie en el suelo) es constante si lo comparamos con los cambios en la duración de la fase previa (cuando el pie sí que está apoyado), para la mayoría de los animales. Estos dos gráficos muestran la duración de la fase de balanceo y la duración de la fase de posición previa para las extremidades posteriores del gato y de la cucaracha en relación con el tiempo del ciclo: el intervalo que discurre desde el principio de una fase de balanceo hasta el comienzo de la siguiente. Las escalas coloreadas indican la velocidad, que ha sido medida en unidades apropiadas para cada animal.

queda modificado por el estímulo sensorial. Una consecuencia de tal demostración es la verificación de que el mecanismo fundamental del caminar de la cucaracha es semejante al del gato. Ahora bien, la simplicidad relativa del sistema de marcha de la cucaracha ha aportado una valiosa información sobre los mecanismos de los que se sirve la actividad refleja para modular el ritmo generado centralmente; ello, a su vez, ha abierto nuevos horizontes que permiten la comprensión de sistemas más complejos.

La mayor parte de la presente investigación sobre la marcha se ordena a cuatro objetivos: (1) obtener una descripción precisa de los movimientos de las patas y determinar qué músculos producen esos movimientos; (2) establecer los mecanismos que dentro del sistema nervioso central originan el ritmo básico de marcha; (3) determinar la función de información sensorial de los receptores de las patas, y (4) determinar los mecanismos nerviosos para la coordinación de la marcha en las distintas extremidades. Los dos animales más intensamente estudiados han sido el gato y la cucaracha. Aquí resumiré algunos de los principales hallazgos de los experimentos que afectan a estos dos animales, haciendo especial hincapié en algunas semejanzas que ponen de manifiesto principios generales sobre el control de la marcha.



LOS IMPULSOS RECIPROCOS de la actividad eléctrica se registran en los músculos flexores y en los extensores durante la fase de balanceo *(blanca)* y la fase previa *(gris)* respectivamente, para el gato que camina sobre la cinta *(arriba)* y para la cucaracha que lo hace libremente *(abajo)*. El período de actividad eléctrica corresponde al de contracción muscular.

En el gato hay cuatro tipos fundamentales de movimiento: la marcha a paso normal, el trote, el paso rápido y la carrera *(véase la ilustración superior de la página anterior)*. Durante la marcha a paso normal, el trote y el paso rápido, las dos patas posteriores se mueven alternativamente, e igual ocurre con las dos patas anteriores. Las diferencias entre los tres tipos de movimiento fundamentales residen en la frecuencia de los pasos de las dos patas de un flanco del animal. Durante la marcha a paso corto, la extremidad anterior izquierda, por ejemplo, se mueve inmediatamente después de la extremidad posterior izquierda, y antes de la derecha posterior. Así pues, la secuencia de marcha será extremidad posterior izquierda, extremidad anterior izquierda, extremidad posterior derecha, extremidad anterior derecha, y así sucesivamente.

La transición de marcha normal a trote es continua, dado que con un incremento en la velocidad de marcha una extremidad delantera empieza a dar un paso antes de que la extremidad posterior opuesta llegue al suelo. Cuando la velocidad es tal que las extremidades diagonalmente opuestas dan los pasos al mismo tiempo, el animal se mueve al trote. El paso rápido se produce a la misma velocidad que el trote, o a una velocidad ligeramente superior; se caracteriza porque las dos patas de un mismo flanco dan el paso simultáneamente. Durante la carrera, las extremidades opuestas (izquierda con derecha) se mueven casi sincrónicamente, y las extremidades anteriores alternan con las posteriores. El resumen general que resulta de este análisis es que el acoplamiento entre extremidades adyacentes (a lo largo o a través del animal) puede darse en concordancia (dando los pasos al mismo tiempo) o en oposición de fase (alternativamente).

Los movimientos comúnmente observados en anfibios y artrópodos se parecen a la marcha normal y al trote de los gatos. En la cucaracha, dotada de seis apéndices, los pasos de las extremidades adyacentes alternan durante la marcha a velocidad moderada y durante la marcha a mayor velocidad. Así, el paso de las tres patas, posterior derecha, media izquierda y frontal derecha, alternan con el paso de la posterior izquierda, media derecha y frontal izquierda. En consecuencia, el animal se mantiene siempre sobre tres patas al menos, por cuya razón se habla de marcha trípeda. Cuando la velocidad de la marcha normal decrece, podemos describir perfectamente el paso de un animal como una secuencia de atrás adelante, para las tres patas de cada flanco del animal. En todo instante, las dos patas de cualquier segmento del insecto alternan estrictamente.

En el paso lento, es característica común del gato y de la cucaracha la secuencia del movimiento de atrás adelante. Esto es también cierto para la mayoría de los animales, un hecho que se ve claramente en aquellos que tienen muchas patas, tales como los milpiés y ciempiés, donde las "ondas" de los pasos parecen moverse de atrás adelante.

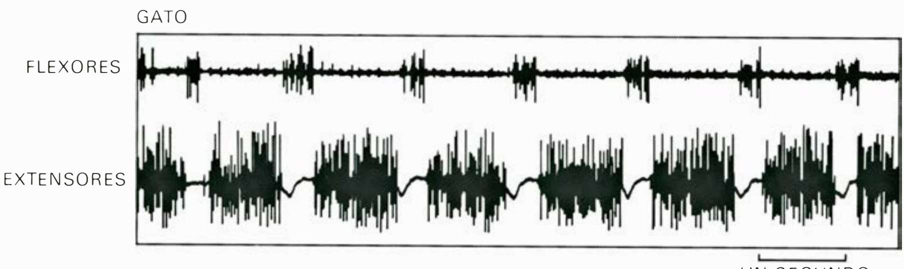
El ciclo de pasos, para cada pata, consta de dos fases principales: la fase de balanceo, cuando el pie está levantado del suelo y se mueve hacia adelante y la fase de fijeza, cuando el pie pisa sobre el suelo y la extremidad se arquea hacia atrás con respecto al cuerpo. La fuerza propulsora para el avance se desarrolla durante la fase de fijeza. Una caracterís-

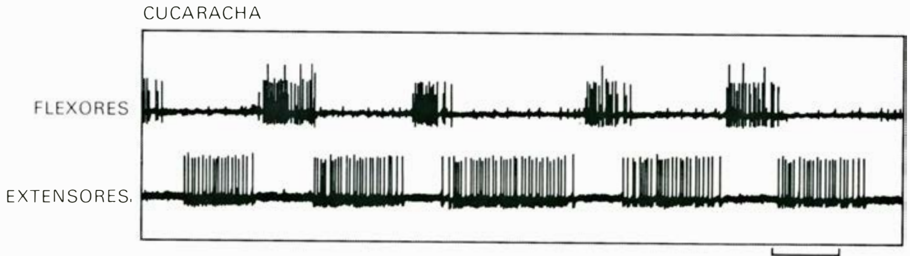
tica común de todo el ciclo, en la cucaracha y en el gato (y en la mayoría de los animales, incluido el hombre), es que la duración de la fase de balanceo permanece comparativamente constante al variar la velocidad de la marcha. Por tanto, los cambios en la velocidad de avance están producidos primariamente por cambios en el tiempo que se necesita para la retracción de las extremidades durante la fase de fijeza.

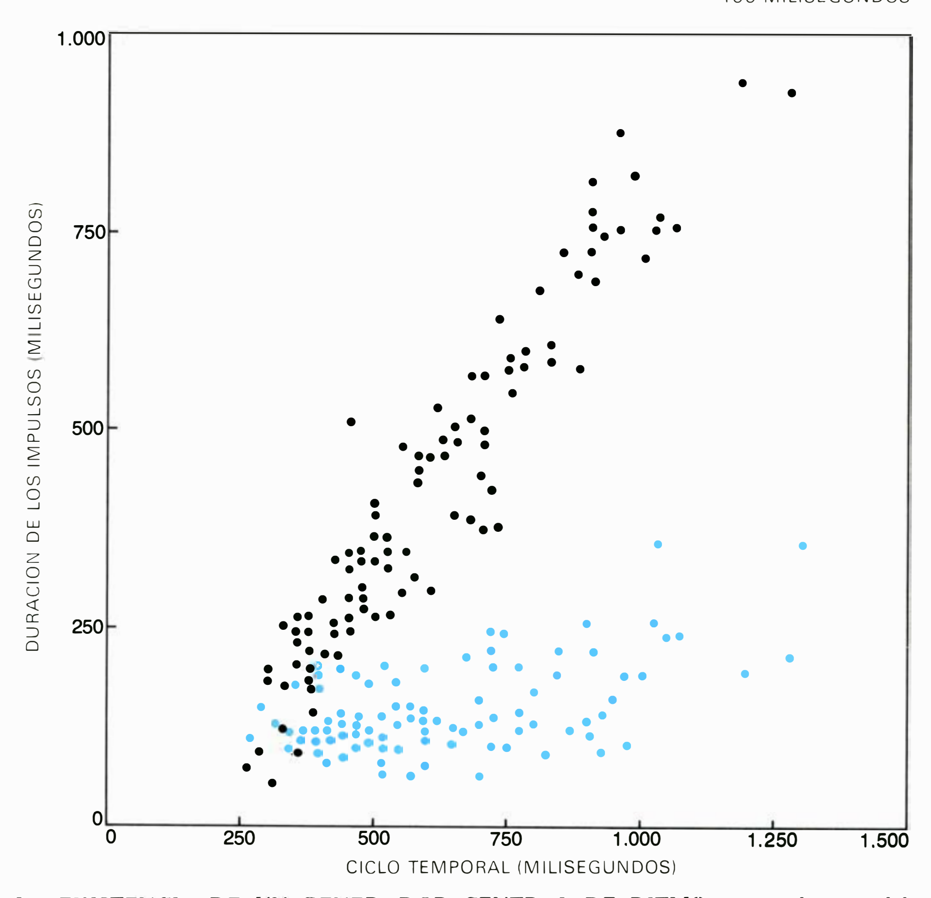
La técnica más simple para determinar qué músculos intervienen en una y otra fase del ciclo estriba en registrar la actividad eléctrica de los músculos de las extremidades de un animal que camine. Las contracciones musculares se inician gracias a una serie de breves potenciales eléctricos que se propagan a lo largo de la membrana externa de cada fibra muscular. La actividad eléctrica total de las diferentes fibras puede obtenerse con la implantación de finos electrodos en el músculo. Los registros obtenidos mediante este método reciben el nombre de electromiogramas.

Para realizar electromiogramas en los músculos de la pata de una cucaracha que camina libremente, se colocan en cada uno de los músculos del apéndice los extremos no aislados de dos cables muy finos (dos milésimas de pulgada de diámetro); los alambres se aplican a cada músculo encargado del movimiento en torno a una articulación. Los otros extremos de los registradores están conectados a una terminal montada por encima del animal; las longitudes de los cables se hallan acopladas, a fin de que el animal pueda caminar libremente en una superficie de algo más de medio metro de diámetro. Las señales eléctricas de cada músculo se amplifican y se recogen en un osciloscopio, en donde pueden fotografiarse. El registro magnetofónico permite, posteriormente, un análisis mediante computadora. Para reducir el efecto mecánico que los cables del registro puedan tener sobre el movimiento, los registros se aplican normalmente sobre dos músculos al mismo tiempo. No obstante, pueden implantarse hasta 24 electrodos en un mismo ejemplar de experimentación. La técnica que se emplea en el registro de electromiogramas de los músculos en otros animales en actividad de marcha es similar, en principio, al método desarrollado para la cucaracha.

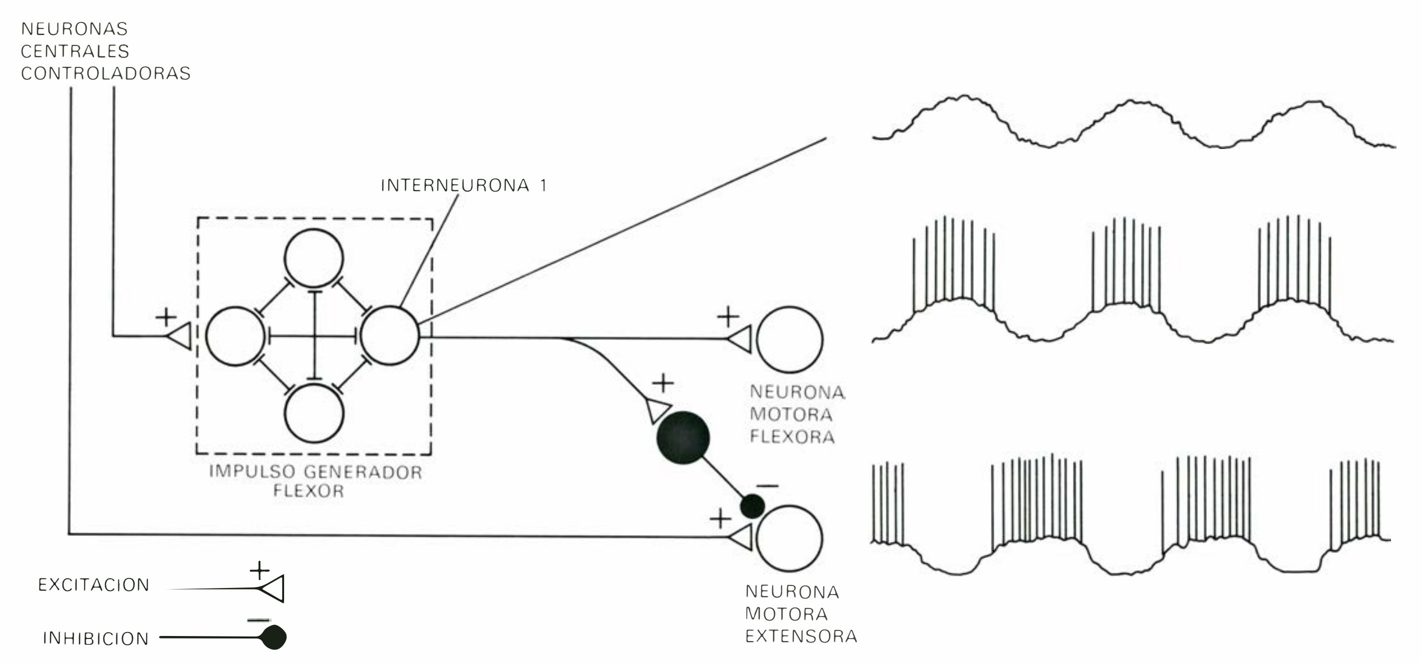
La mayoría de los músculos que intervienen en los movimientos de las extremidades posteriores del gato y de la cucaracha pueden clasificarse en músculos flexores y músculos extensores, según que su función sea reducir el ángulo de la articulación o aumentarlo. Los registros electromiográficos de los músculos durante la marcha han mostrado que la actividad eléctrica de los flexores alterna con la actividad eléctrica de los extensores. Los pulsos de actividad alternantes que se han observado, se hallan bien correlacionados con el movimiento de la extremidad. Los flexores empiezan a descargarse ligeramente antes de la iniciación de la fase de balanceo; las contracciones resultantes en estos músculos levantan rápidamente el pie del suelo y lo mueven adelante en relación a la







LA EXISTENCIA DE UN GENERADOR CENTRAL DE RITMO para cada pata del gato y de la cucaracha se demuestra por el hecho de que aun cuando se había desconectado toda la información sensorial de los receptores de las extremidades posteriores, se generaron descargas de actividad eléctrica, rítmicamente alternante, en los músculos flexores y en los extensores de las extremidades posteriores de uno y otro animal *(trazos superiores)*. **La gráfica inferior muestra que, en la cucaracha, la duración de las descargas flexoras generadas desde el centro** *(puntos coloreados)* **permanecen constantes en contraste con la duración de las descargas extensoras** *(puntos negros)*. **Los datos eléctricos son coherentes con el comportamiento que, en la marcha normal, la duración del balanceo es constante.**



ORGANIZACION del sistema central generador del ritmo para cada pata trasera. Las interacciones de un sistema de interneuronas, llamado colectivamente generador de descarga flexora, producen oscilaciones en los potenciales eléctricos de la membrana de uno de los miembros de este grupo de interneuronas *(interneurona 1)*. Esas oscilaciones de los potenciales de membrana generan descargas recíprocas de actividad eléctrica en las neuronas motoras flexoras e inhiben la actividad en las neuronas motoras extensoras. El generador de descarga flexora y las neuronas motoras extensoras son activadas, aquí, por las interneuronas controladoras centrales del encéfalo.

situación del cuerpo. En el gato, los extensores se activan bastante antes del final de la fase de balanceo, provocando que la extremidad se enderece cerca del final de esa fase, y dé una gran zancada. Los extensores permanecen activos durante la mayor parte de la fase de fijación, para soportar el peso del animal y desarrollar la fuerza que lo impulsará hacia adelante. De una forma parecida, en la extremidad posterior de la cucaracha, la actividad de los músculos extensores durante la fase de fijación endereza la pata y desarrolla el impulso hacia adelante para ponerse a andar.

En uno y otro animal, las variaciones en amplitud y en tiempo del impulso de la actividad eléctrica, en los muy dispares músculos flexores y extensores de cada pata, son complejas y dependen de la velocidad de marcha. No se sabe gran cosa de cómo el sistema nervioso central crea esos tipos complejos de actividad eléctrica. Sin embargo, se ha prestado gran atención al problema, aparentemente más sencillo, de la determinación de los mecanismos que son responsables de la generación del modelo fundamental de actividad alternante en los flexores y extensores.

En los últimos años, se han acumulado gran cantidad de pruebas que respaldan la propuesta primitiva de Graham Brown, según la cual el ritmo básico del paso observado en cada extremidad del gato viene generado por mecanismos que tienen su sede en la médula espinal; es decir, hay un generador central de ritmo para cada apéndice. Las pruebas de la existencia de estos generadores de ritmo se deben a las amplias investigaciones de Sten Grillner, y sus colegas suecos, sobre los modelos de actividad que se registran en los músculos flexores y extensores después de la eliminación de la información sensorial procedente de los receptores de la patas de los gatos en estado de marcha. (La información sensorial puede eliminarse fácilmente seccionando las raíces dorsales. Estas constituyen varios paquetes de nervios que entran en la médula espinal y contienen casi todas las fibras nerviosas sensoriales de las patas, pero ninguna de las motoras que inervan los músculos.) Uno de los más importantes resultados conseguidos por los investigadores suecos fue que, después de que los segmentos de la extremidad posterior habían sido aislados (cortando ya la médula espinal o la parte superior del bulbo), los modelos, de ritmia recíproca, de actividad, en flexores y extensores de la extremidad posterior del gato, podrían generarse incluso en ausencia de la información sensorial, procedente de los receptores periféricos, en la pata. Es más, observaron que, cuando a tales gatos "espinales" o "descerebrados" se les hacía caminar sobre una cinta sin fin, la secuencia temporal de activación de los distintos músculos de la extremidad posterior no quedaba alterada por la eliminación de la información sensorial de las extremidades posteriores. Este último resultado mostró que, amén de la generación central del ritmo básico, a los mecanismos centrales les competía determinar el orden en que son activados los distintos músculos.

A resultados muy parecidos llegaron tanto John F. Iles como el autor del artículo, investigando con la cucaracha. Después de eliminar toda la información sensorial de las extremidades de los animales, a los que se había cortado la cabeza; descubrimos que persistía el modelo recíproco en las neuronas motoras, flexoras y extensoras, de la extremidad posterior, que se conservaba la secuencia de activación de las distintas neuronas motoras como ocurría en los animales cuyo desplazamiento era normal, y que seguía siendo constante la duración de la actividad flexora. Evidentemente, existían en los niveles inferiores del sistema nervioso de la cucaracha mallas de neuronas que podían generar la secuencia rítmica de actividad eléctrica en flexores y extensores, similar a la actividad observada en estos músculos durante la marcha normal.

Se ha visto que los modelos de actividad motora generados centralmente sirven de base a todas las clases de comportamiento estereotipado, tanto en invertebrados como en vertebrados; esa clase de comportamiento comprende la respiración, los movimientos de los ojos, la masticación, la deglución y el vuelo. Los neurofisiólogos suelen referirse a ese tipo de actividad como programas motores.

Ahora comienzan a comprenderse los

mecanismos celulares responsables de que se generen centralmente los impulsos rítmicos de actividad en las neuronas motoras. Se ha avanzado muy poco en la comprensión del modo de actuación de tales mecanismos en los vertebrados, debido principalmente a la extraordinaria complejidad de su sistema nervioso. Así ha resultado que la mayoría de nuestros conocimientos sobre las bases celulares de la generación central de ritmo parten de investigaciones sobre invertebrados. En estos animales se ha hallado que la actividad rítmica puede generarse en las neuronas motoras de dos formas cualitativamente diferentes: puede resultar de la actividad oscilatoria intrínseca que se registra en las células nerviosas aisladas llamadas marcapasos, o bien puede aparecer como una propiedad de un grupo de neuronas interconexas, ninguna de las cuales tiene la propiedad de la oscilación intrínseca. No hay pruebas de que, en los sistemas de marcha de los animales, las células nerviosas marcapasos sean las responsables de la generación de los modelos motores rítmicos. Sí las hay, por el contrario, de que un grupo de células nerviosas interconexas generan el ritmo recíproco de actividad en la extremidad posterior de la cucaracha.

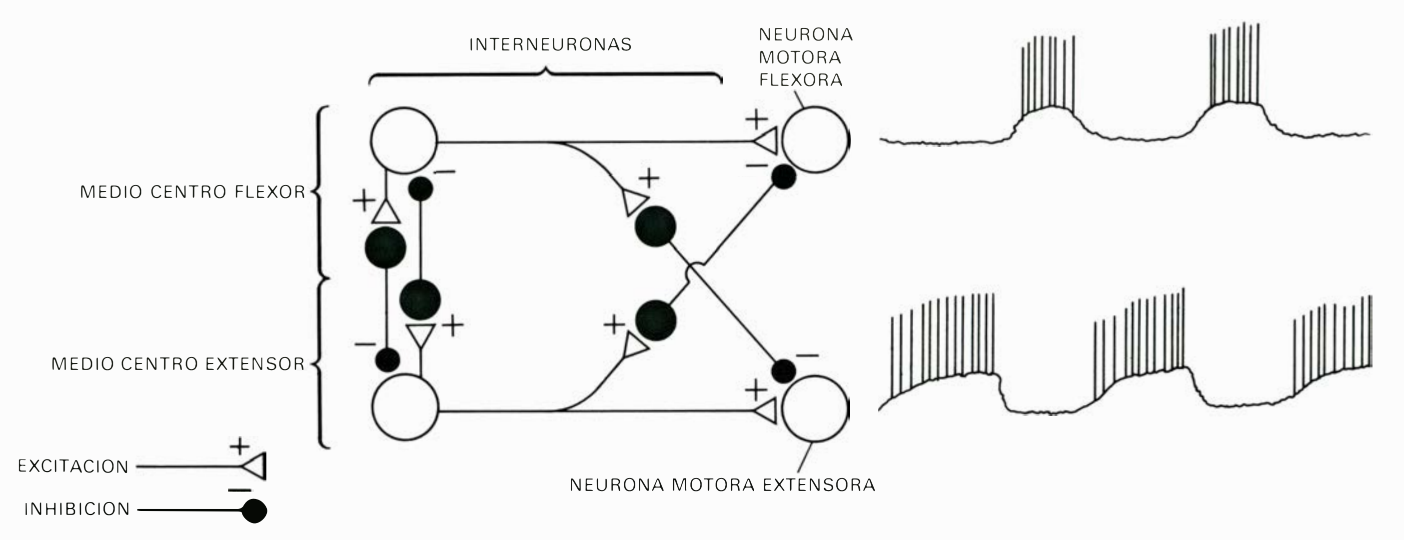
Los modelos de actividad en las neuronas motoras, flexoras y extensoras, de la cucaracha, esto es, en las células nerviosas que originan la contracción de los músculos flexores y extensores, dieron pie a que Iles y el autor manifestaran, en 1970, que la actividad recíproca de descarga está generada por un sistema de interneuronas (al que llamaron generador de descargas o impulsos flexores); éstas excitan periódicamente las neuronas motoras flexoras e inhiben las neuronas motoras extensoras. Siguiendo en ello, Charles R. Fourtner y el autor consiguieron obtener registros intracelulares, con microelectrodos, de las interneuronas del sistema nervioso de la cucaracha durante los movimientos rítmicos de la extremidad. Nuestros resultados apoyaron plenamente la idea de un sistema de generador de descargas o impulsos flexores. Identificamos una única interneurona en la que el potencial eléctrico a través de la membrana externa oscilaba en fase con la actividad de descarga rítmica acaecida en las neuronas motoras flexoras. Cuando se crearon artificialmente oscilaciones similares en el potencial de membrana de esta interneurona, mediante el paso de corriente a través del electrodo registrador, pudimos imitar las descargas de actividad normalmente generadas en las neuronas durante los movimientos rítmicos de la pata. Además, la excitación de las neuronas motoras flexoras estuvo acompañada de la inhibición de toda actividad espontánea en las neuronas motoras extensoras.

La interneurona excita los flexores e inhibe los extensores; por ello, al parecer, pertenece a una red de células nerviosas, y justamente la interacción entre los miembros de la red es la responsable de la actividad rítmica de los flexores. Un aspecto importante de este sistema generador de ritmo en la cucaracha es la asimetría, es decir, no se ha advertido la existencia de un sistema de neuronas responsable de la generación de las descargas extensoras. Los extensores son excitados continuamente; su actividad queda periódicamente interrumpida por inhibición del generador de impulsos flexores. Este da lugar a una descarga de actividad eléctrica, constante en su duración, independientemente de la velocidad a que se producen las descargas; en consecuencia, la duración de la fase de balanceo varía sólo ligeramente con la velocidad de marcha.

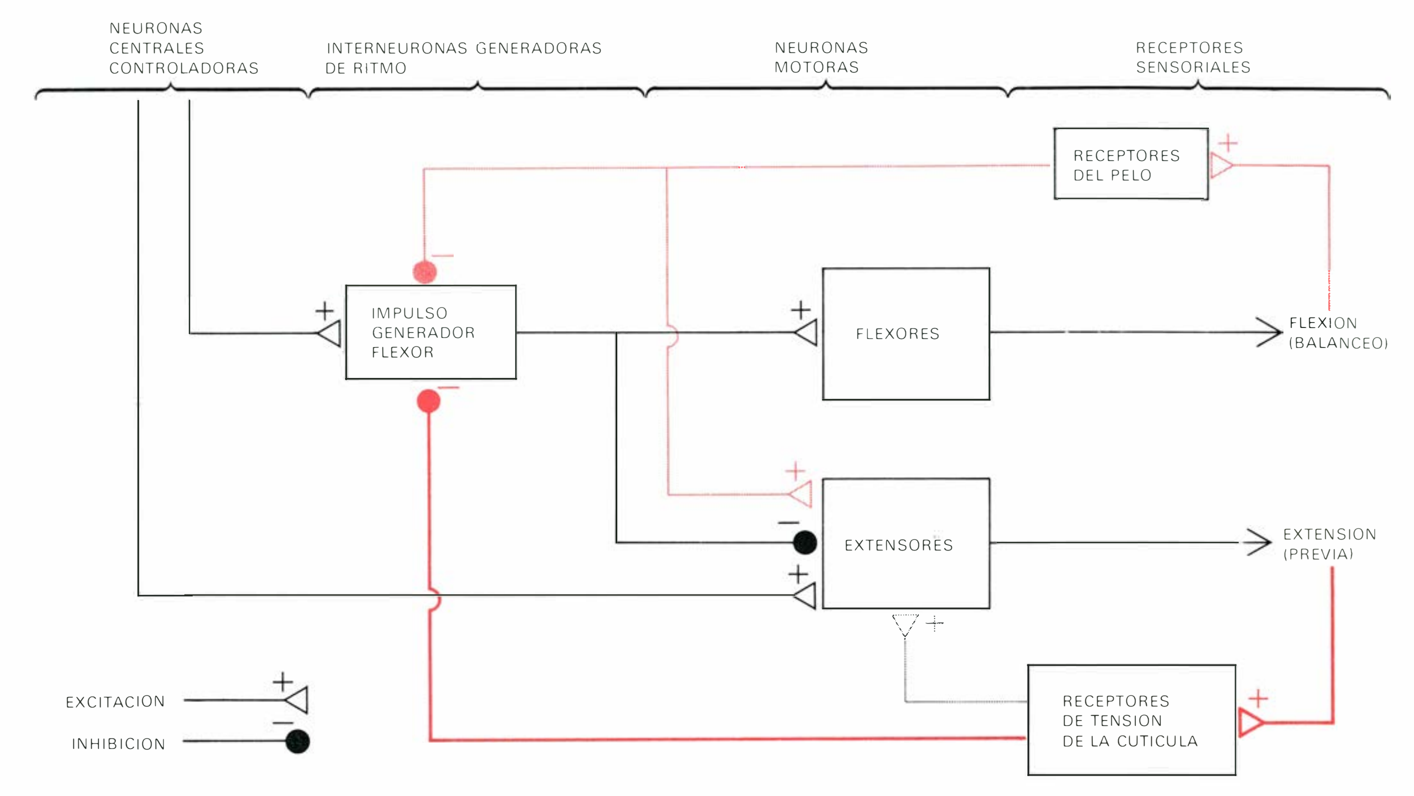
Aunque se conoce muy poco del modo de generarse el ritmo de marcha en la médula espinal del gato, sí se sabe que el ritmo no depende del acoplamiento directo de las neuronas motoras. Como en la cucaracha, responsables del mismo son las interacciones dentro de una red de interneuronas. Actualmente, hay sobre el tapete varios modelos sobre la forma cómo los sistemas de interneuronas originan el ritmo de la marcha; entre los modelos se encuentra uno propuesto originalmente por Graham Brown en 1914, pero no se dispone todavía de información suficiente que permita abrazar cualquiera de ellos.

La existencia de un generador central de ritmo para cada pata no significa que la información sensorial no sea importante a la hora de conformar la actividad motora.

La información sensorial resulta esencial para el animal si éste es capaz de adaptarse prestamente en su movimiento de marcha para compensar las irregularidades del terreno que pisa. Por ejemplo, la marcha de las extremidades posteriores de un gato, que ha sido sometido



MODELO DE MEDIO CENTRO para explicar la generación central de la actividad rítmica recíproca en las neuronas motoras, extensoras y flexoras, de la pata posterior del gato, propuesto originariamente por el neurofisiólogo británico T. Graham Brown hace más de 60 años; la representación aducida es su versión moderna. De acuerdo con este punto de vista, las neuronas motoras, flexoras y extensoras, en unión con las interneuronas impulsoras asociadas, constituyen cada una un "medio centro". Se supone que los dos medios centros se inhiben mutuamente entre sí, de tal manera que cuando uno está activo el otro está inactivo. Para que se genere la actividad rítmica se necesita que algún mecanismo desencadene la actividad de un medio centro al otro. Un mecanismo posible de desencadenamiento sería una inactivación intrínseca, proporcionalmente lenta, del medio centro activo, cuyo efecto podría ser disminuir la inhibición del otro medio centro, lo cual lo iría capacitando para que pasara a un estado activo. También se han propuesto otros modelos.



VIAS REFLEJAS en la pata trasera de la cucaracha. Se hallan organizadas de tal manera que modifican los patrones de actividad generados centralmente en las neuronas motoras flexoras y extensoras. Durante la fase de posición o previa, se excitan los receptores de tensión de la cutícula de la pata; la información de esos receptores produce la inhibición del generador de descargas flexoras *(líneas de color llenas)*, **con lo cual se evita la iniciación de la fase de balanceo hasta que la pata deja de estar sometida a una carga, al final de la fase previa. El efecto reflejo de los receptores de tensión de la cutícula controla, por lo tanto, el desencadenamiento del programa motor desde la fase previa hasta la fase de balanceo. La activación de los receptores capilares durante el balanceo inhibe el generador de descargas flexoras** *(líneas de color punteadas)*, **en las postrimerías de la fase de balanceo, determinando que pase el programa de la fase previa a la de balanceo. Ello se ve facilitado por un efecto excitador de los receptores pilosos sobre los extensores. Los receptores de tensión de la cutícula excitan también las neuronas motoras extensoras durante la fase previa** *(vías grises)*; **este reflejo refuerza la información excitadora central hacia las neuronas motoras. El control de las neuronas centrales procede de las interneuronas del encéfalo.**

a una transección espinal o cerebral, se adapta para igualar la velocidad de la cinta sin fin dentro de un amplio espectro de velocidades. Dado que hay un pequeño cambio en la duración de la fase de balanceo, la adaptación del ciclo de marcha a la velocidad de la cinta comporta una reducción del tiempo que dura la fase de posición (fase previa). Este fenómeno se explica porque hay una señal sensorial que indica la terminación de la extensión de la pata durante la fase previa y desvía el programa motor de la fase previa a la fase de balanceo. Así pues, siguiendo una fase de balanceo estereotipada, el pie está apoyado sobre la cinta y se mueve hacia atrás con la velocidad de la cinta hasta que una señal sensorial dispara el comienzo de la siguiente fase del balanceo.

Para que se inicie la fase de balanceo, se necesitan, al parecer, dos condiciones. Primero, la articulación de la cadera debe estar extendida; en segundo lugar, los músculos extensores deben estar relajados. Ambas condiciones llegan a su cumplimiento casi al final de la fase previa. La descarga sensorial se efectúa por medio de circuitos alojados en el interior de los segmentos de la médula espinal correspondientes a la pata posterior. A esta importante conclusión se ha llegado tras los trabajos de Grillner y de sus colegas Serge Rossignol y Hans Forssberg; demostraron que, evitando la extensión de la extremidad posterior de un gato desmedulado que se moviera sobre una cinta sin fin, inhibe el movimiento de marcha en esta pata. Si se deja que la extremidad se extienda lentamente, la fase de balanceo puede comenzar cuando la pata está en una posición muy afín a la posición con la que se inicia la fase de balanceo durante la marcha normal.

El principio de que la pata debe relajarse para que comience la fase de balanceo se aplica también al sistema de marcha de la cucaracha. La activación de los receptores que detectan fuerzas en la cutícula (el duro esqueleto externo) de la pata durante la fase de posición causa la inhibición del sistema generador de impulsos flexores de las interneuronas, y, de este modo, evita el paso de la fase previa a la fase de balanceo. Cuando se extiende la pata durante la fase previa, disminuyen las tensiones en la cutícula, ya que el peso del animal es soportado mayormente por las otras patas. Este movimiento elimina la influencia inhibitoria de los receptores de tensiones de la cutícula que induce el generador de descargas flexoras; de esta suerte, el sistema se halla capacitado para pasar a un estado de activación y producir así la fase de balanceo.

En la cucaracha, la iniciación del programa motor, desde la fase de balanceo a la de posición (fase previa), viene activada también por información sensorial. Los movimientos de flexión, durante la fase de balanceo, excitan a un grupo de receptores pilosos. La información procedente de estos receptores inhibe a las neuronas motoras flexoras y al sistema generador de las descargas flexoras. Este último efecto termina la descarga flexora (y, por lo tanto, la fase de balanceo) y capacita a la pata para iniciar la fase previa. La iniciación de ésta queda también facilitada por una conexión excitadora desde los receptores pilosos hasta las neuronas motoras del músculo extensor. El trayecto inhibidor desde los receptores pilosos hasta el generador de descarga flexora asegura que la posición de la pata, al final de la fase de balanceo,

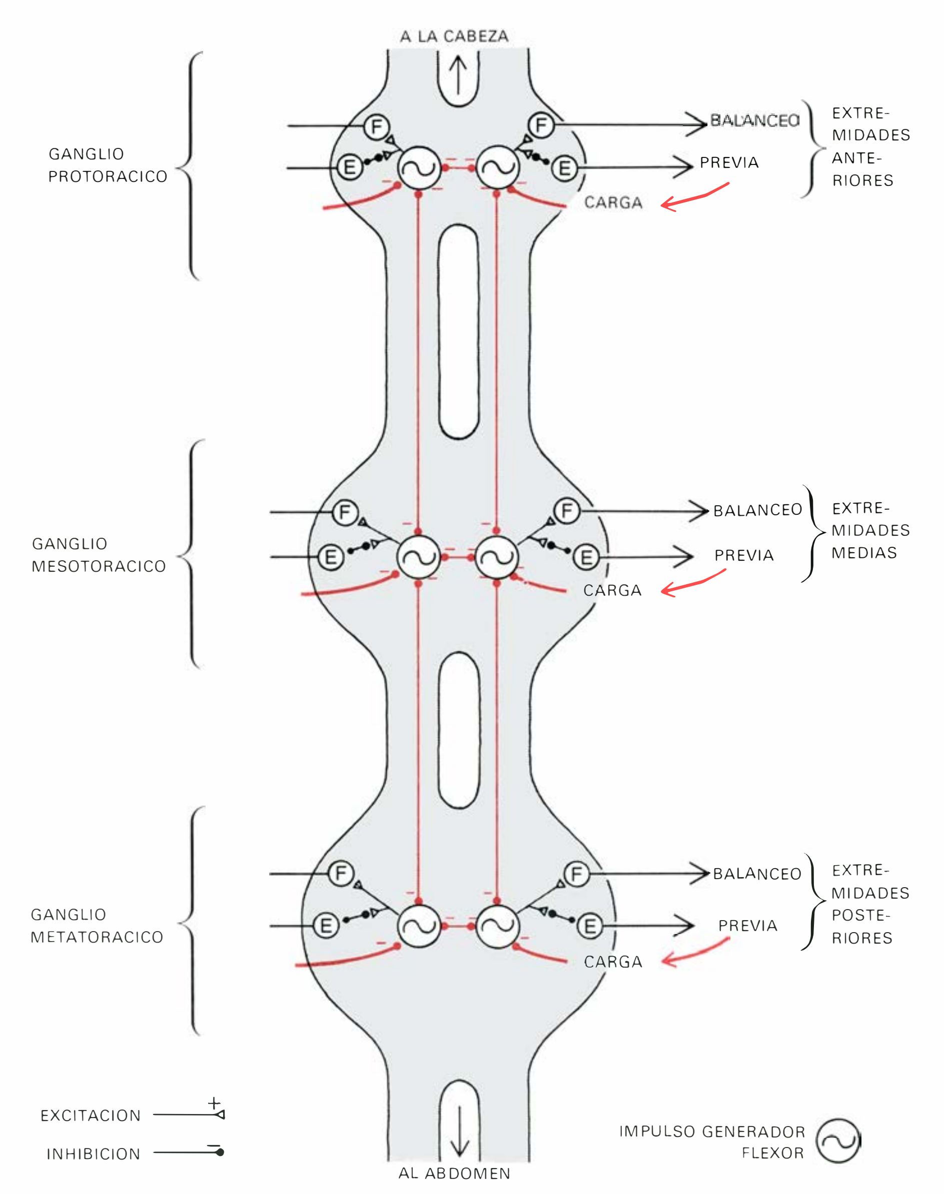
permanezca constante con independencia de la posición al empezar.

Compete a la información sensorial que el programa motor pase de una fase a la otra; pero también es cierto que le compete modificar el programa motor durante la ejecución de una fase. Grillner y sus colaboradores describieron un reflejo funcionalmente importante de este tipo en la extremidad posterior de un gato desmedulado. Demostraron que la estimulación mecánica o eléctrica de los receptores de la piel en la parte superior de uno de los pies posteriores del gato, durante la fase de balanceo, causa un gran incremento en la actividad eléctrica de los flexores de la pata y, en consecuencia, el animal eleva un poco más la pata. La función de este reflejo, en condiciones naturales, se observará fácilmente, pues la parte superior del pie chocará en bastantes ocasiones contra un objeto fijo. Por tanto, la elevación refleja del pie le permitirá, evitar el obstáculo. Característica significativa de este reflejo es que aparece en el animal desmedulado. Síguese, pues, que esta compensación automática, en el ciclo de marcha, de las perturbaciones externas, no requiere la participación de los niveles superiores del sistema nervioso.

En la cucaracha, el circuito de retroalimentación de los receptores de tensión de la cutícula excita las neuronas motoras extensoras durante la fase previa. Dado que estas neuronas motoras son activas durante la fase previa, la información sensorial potencia la amplitud de la actividad extensora. El efecto puede considerarse como un reflejo de refuerzo; su función es compensar las variaciones de carga cuando la resistencia a la extensión cambia inesperadamente. Por ejemplo, si el peso soportado por la pata se incrementa súbitamente debido a un movimiento irregular de una o varias de las otras patas, hay un incremento en la actividad de los receptores de tensión de la cutícula, y, por consiguiente, un incremento en la actividad extensora para resistir cualquier tendencia de la carga adicional en el sentido de disminuir la tasa de extensión. En la pata posterior del gato, puede funcionar también un reflejo de refuerzo durante la fase previa para ayudar a compensar cualquier incremento inesperado de la carga que pesa sobre los músculos extensores; en efecto, el incremento de resistencia a la extensión de la pata, durante la fase previa, motiva un incremento notable en la actividad extensora. Esta compensación refleja requiere una cantidad significativa de tiempo y podría funcionar sólo efectivamente en un gato que esté caminando más bien despacio.

En resumen, parece claro que los reflejos tienen dos funciones completamente diferentes en el control del ciclo de la marcha de una extremidad. La primera es desencadenar el programa motor de una fase a otra (esto es, iniciar la fase de posición o previa, o iniciar la fase de balanceo) y, segunda, modificar el programa motor dentro de una fase previa.

Se sabe muy poco de los mecanismos que coordinan la marcha en las diferentes patas. Existen, evidentemente, tres mecanismos que pueden funcionar para coordinar la marcha: (1) acoplamiento central directo de los generadores de ritmo en cada pata, a través de vías totalmente interiores al sistema nervioso; (2) acoplamiento indirecto de los generadores de ritmo mediante unión mecánica, de forma que los movimientos de cualquier extremidad deberían alterar las influencias sensoriales en los generadores de ritmo de las otras patas; (3) influencias sensoriales directas, comunicadas desde una pata a los generadores de ritmo de las otras. Se ha demostrado el acoplamiento inhibidor central entre generadores rítmicos adyacentes que ocurre en los desplazamientos del gato y de la cucaracha. Subsecuentemente a la eli-



LA COORDINACION DEL MOVIMIENTO en las seis patas de una cucaracha se realiza a través de las vías nerviosas, esbozadas aquí sobre el fondo de la médula nerviosa torácica del insecto *(gris)*. **Para cada pata existe, dentro de la médula nerviosa torácica, un generador de impulsos flexores, que, cuando se activa, excita a los flexores para producir la fase del balanceo. Los generadores de descargas flexoras adyacentes se inhiben mutuamente entre sí; en consecuencia, dos patas adyacentes no pueden moverse al mismo tiempo. La existencia de tales vías explica el patrón básico, de movimientos alternantes, en las patas adyacentes. Una información inhibitoria, desde los receptores de tensión de la cutícula hasta los generadores de descargas flexoras, impide que ninguna pata se mueva cuando se halla sometida a una carga durante la fase previa** *(vías de color)*; **en consecuencia aporta un mecanismo que permite adaptar el patrón de movimientos de la pata cuando el animal camina por una superficie irregular.**

minación de toda información sensorial de las extremidades posteriores de los gatos desmedulados, la actividad motora de las patas opuestas continúa con un patrón de ritmia alternante similar a la observada durante la marcha normal. Por otra parte, en la cucaracha la actividad flexora de las extremidades adyacentes raramente tiene lugar de forma sincrónica, incluso una vez que se haya eliminado la información sensorial.

Este tipo de observación en la cucaracha, unido al análisis de la actividad eléctrica en las interneuronas que conectan segmentos adyacentes del insecto, indujo a Iles y al autor a la conclusión de que los generadores de impulsos flexores adyacentes se inhiben mutuamente unos a otros por medio de conductos centrales. Los acoplamientos inhibitorios mutuos entre generadores de impulsos flexores adyacentes explica el comportamiento observado de que las extremidades adyacentes nunca actúan al mismo tiempo. Además del acoplamiento inhibitorio central, hay que destacar los acoplamientos indirectos de generadores de ritmo mediante uniones mecánicas, que son importantes para coordinar la marcha en la cucaracha, cuando el animal avanza por una superficie desigual.

En una cucaracha en movimiento, se evita que las patas que sostienen el peso del animal inicien la fase de balanceo, porque la actividad propia de los receptores de tensión de la cutícula inhiben los generadores de impulsos flexores que están asociados con cada una de estas patas. La fase de balanceo puede iniciarse tan sólo en las patas que transportan poca o ninguna carga. Cuando una pata en movimiento encuentra un soporte firme, se carga con parte del peso del animal y así reduce la carga transportada por otra u otras extremidades. Este efecto puede bastar para permitir la iniciación de la fase de balanceo en las otras patas. Sometida como está a la condición de que nunca dos patas adyacentes pueden moverse al mismo tiempo (a causa de la inhibición mutua entre generadores de descargas flexoras adyacentes), no tiene porqué haber necesariamente una relación temporal, precisa y predecible, entre los movimientos de marcha de las diferentes patas cuando el animal camina sobre una superficie irregular. La inhibición de los generadores de impulsos flexores a través de la información sensorial de los receptores de tensión de la cutícula (que indican el peso transportado por la pata) es un mecanismo eficaz que posibilita la adaptación automática del paso del animal a la orografía del terreno que pisa.

Todos los generadores de descarga flexora en la cucaracha pueden considerarse simples elementos decisorios. Y la decisión es si echar a andar o no. El generador de la descarga flexora toma la decisión sobre las bases de la información que procede de los receptores periféricos que señalan el estado de esa pata y de la información de otros generadores de descarga flexora que señalan el estado de las patas adyacentes. La decisión de iniciar la marcha se toma cuando la posición de todas las patas es tal que la marcha no desencadenará inestabilidad de ningún tipo.

El resultado de las recientes investigaciones sobre el control nervioso de la marcha, en muchos y distintos animales, ha demostrado que los circuitos nerviosos básicos de la marcha se encuentran localizados en los niveles inferiores del sistema nervioso. El trabajo sobre el gato, por ejemplo, ha confirmado la conclusión de Sherrington y Graham Brown de que el caminar es esencialmente un acto autónomo, el cual depende, por encima de todo, de los circuitos nerviosos del interior de la médula espinal. Un rasgo importante de los sistemas de marcha en todos los animales es, al parecer, que los centros nerviosos superiores no son necesarios para los patrones fundamentales de la actividad motora.

Ello no significa que los centros superiores no desempeñen un papel en el control de la marcha. Están implicados en el comienzo y en el mantenimiento de la marcha, pero los caminos que gobiernan la marcha, a partir de ellos, no se han podido describir. Otra función importante de los centros superiores, particularmente en mamíferos y aves, es modular el programa motor básico de la marcha en respuesta a la información sensorial que procede de los receptores cefálicos, tales como los ojos y el aparato vestibular (el órgano receptor del oído que percibe la posición y movimiento de la cabeza). La modulación del programa motor mediante la información que procede de los receptores cefálicos funciona presumiblemente no sólo para controlar la dirección de la marcha, sino también para ayudar a asegurar que el equilibrio y la estabilidad se mantengan en todo momento.

Hay otras dos sorprendentes semejanzas entre los mecanismos responsables del control de la marcha en el gato y los mecanismos responsables en la cucaracha. La primera es que el ritmo recíproco básico de la actividad eléctrica en flexores y extensores puede generarse en ausencia de la información sensorial procedente de los receptores de las patas. En uno y otro animal, además, la duración de las descargas flexoras generadas centralmente resulta constante, si la comparamos con la variación en la duración de los impulsos extensores. Este descubrimiento corresponde a la observación de que la duración de la fase de balanceo permanece esencialmente constante para cambios bruscos en la velocidad de marcha.

La segunda semejanza es que los reflejos funcionan desencadenando la actividad motora desde la extensión hasta la flexión. La iniciación de la fase de balanceo requiere que la pata se extienda y se libere de la carga. Los reflejos pueden funcionar también para modular la actividad motora, mientras se desarrolla la fase de balanceo o mientras lo hace la fase previa. Ambos tipos de reflejos funcionan para modificar el programa motor, a fin de ajustar los movimientos de marcha a las variaciones impredecibles del medio ambiente. Conviene advertir, asimismo, que estos reflejos pueden funcionar en animales después de que se hayan desconectado los niveles superiores del sistema nervioso. Así, la adaptación automática de la marcha al medio ambiente se alcanza parcialmente por medio de vías reflejas, confinadas en los niveles inferiores del sistema nervioso.

A primera vista, las notables afinidades entre los mecanismos fundamentales del control de la marcha en el gato y los mecanismos del control de la cucaracha pueden parecer sorprendentes, en particular cuando se considera que los mamíferos e insectos evolucionaron separadamente a partir de antepasados vermiformes. Las semejanzas se hacen más incomprensibles, no obstante, cuando se recuerda que, en ambos grupos de animales, el sistema de marcha evoluciona en dirección al cumplimiento de la misma función, a saber, que el animal se mueva rápida y establemente por un terreno irregular. Hay numerosos ejemplos en la naturaleza de animales evolutivamente no relacionados que se apoyan en mecanismos similares para cumplir la misma acción; por ejemplo, la similitud del ojo de los moluscos cefalópodos (el pulpo) y el de los vertebrados. La similitud de los sistemas de marcha en el gato y en la cucaracha da a entender que el número de formas de obtener un sistema de marcha óptimamente construido es muy limitado.

A partir del estudio de la marcha en distintos animales han empezado a emerger con nitidez algunos principios comunes que se hallan en la base del control de dicha función.



LA EXPLOSION DE UNA SUPERNOVA en la galaxia NGC 5253 fue de extraordinaria intensidad; durante varias semanas, llegó a resplandecer tanto como el resto de las estrellas de la galaxia juntas. Fue descubierta en mayo de 1972, y fotografiada con el telescopio Schmidt, de 1220 milímetros, en Monte Palomar, por Charles T. Kowal, del Instituto de Tecnología de California. Al ser la quinta supernova descubierta en una galaxia exterior, en 1972, se la consignó con la clave SN 1972e. La secuencia de las fotografías, que van de izquierda a derecha y de arriba abajo, se fue tomando a lo largo de casi un año, a medida que el resplandor de la estrella declinaba, desde el 16 de mayo 1972 (*arriba, a la izquierda*) hasta el 24 de abril de 1973 (*abajo, a la derecha*). El espectro del objeto nos indica que era una supernova de las del Tipo I.

Supernovas en otras galaxias

Estos cataclismos estelares ocurren en una galaxia cada 50 años, aproximadamente. La naturaleza de las supernovas se investiga mucho mejor si observamos otras galaxias distintas de la nuestra

Robert P. Kirshner

Se cree que, en una galaxia, aparece una supernova, que es la explosión catastrófica de una estrella masiva, unas dos veces cada cien años. La última supernova visible desde la tierra en nuestra propia galaxia se detectó en 1604, cinco años antes de que el primer telescopio apuntara hacia el firmamento. Puesto que los grandes telescopios permiten ver, desde la tierra, miles de galaxias, es lógico esperar contemplar, como promedio, una supernova en una u otra galaxia a intervalos de pocos meses. Ello explica que en muchos observatorios de todo el mundo haya astrónomos examinando el firmamento en busca de esas explosiones estelares en galaxias lejanas, explosiones que, durante unas cuantas semanas, pueden eclipsar el brillo del resto de miles de millones de estrellas que forman la galaxia.

A lo largo de los últimos 90 años se han observado cerca de 400 supernovas en otras galaxias. Estas observaciones han coadyuvado en el desarrollo de un cuadro completo del ciclo de la vida de las estrellas. La mayoría de los astrofísicos creen que una supernova es una explosión violenta, que destroza una estrella y pone punto final a su vida de estrella normal. Algunas supernovas pueden dejar restos cósmicos en forma de estrella de neutrones o de agujero negro. También se ha supuesto que deben sintetizarse nuevos elementos en virtud del enorme calor y presión producidos por la explosión, elementos que son expulsados hacia el gas interestelar de la galaxia; y también se ha supuesto que las supernovas constituyen, posiblemente, el origen de los rayos cósmicos que constantemente bombardean la tierra. Se ha avanzado, asimismo, la hipótesis de que la energía liberada por las supernovas debe relacionarse, de alguna manera, con los raros y potentes emisores de energía extragalácticos, cuales son las galaxias de Seyfert y los quasars.

En 1885 se observó la primera y más brillante supernova fuera de nuestra galaxia. En agosto de dicho año, apareció de repente una nueva estrella en la región central de una de nuestras galaxias vecinas, la Gran Nebulosa de Andrómeda. La estrella aumentó su brillo rápidamente, hasta alcanzar la magnitud de siete, sólo un poco más tenue que la más tenue de las estrellas que se ven a simple vista. En aquel entonces, no se sabía todavía si la nebulosa de Andrómeda y otras nebulosas semejantes eran objetos pertenecientes a nuestra galaxia o eran sistemas de estrellas situados fuera de ella. En 1885, se conocían perfectamente las novas ordinarias, que son las explosiones estelares más corrientes, en las cuales una estrella aumenta su brillo unas 10.000 veces. Se supuso que la nueva estrella de la nebulosa de Andrómeda era una nova ordinaria; de esta hipótesis se dedujo la distancia aproximada de la nebulosa, que la confinó claramente dentro de los límites de nuestra galaxia.

Por los años 1920, el estudio de Edwin P. Hubble sobre las estrellas variables de la nebulosa de Andrómeda y de otras nebulosas espirales probó que tales sistemas se hallaban a grandes distancias de nuestra propia galaxia. Sólo entonces se pudo reconocer la verdadera naturaleza de las nuevas estrellas vistas en estos sistemas. Una vez convencidos de que la distancia de la nebulosa de Andrómeda no era meramente de unos miles de años luz, sino de centenares de miles, se apreció con claridad la extraordinaria luminosidad de la supernova de 1885. Esa estrella no fue 10.000 veces más brillante que otra estrella normal, sino unos 10.000 millones de veces más.

Aun después de quedar firmemente establecido que las nebulosas espirales eran galaxias externas, y de reconocerse la magnitud de las supernovas en el interior de aquéllas, no se llegó a un estudio sistemático de supernovas en otras galaxias hasta 1934, año en que Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, empezó su búsqueda. Utilizando una cámara con una lente de 82,55 milímetros de diámetro, colocada en la azotea del edificio del Instituto destinado a Astronomía, sacó muchas fotografías de un espeso cúmulo de galaxias situado en la constelación de Virgo.

Después, examinó cuidadosamente las fotografías en busca de nuevas estrellas. En septiembre de 1936, amplió su investigación gracias al telescopio Schmidt de 457,20 milímetros que acababa de ser instalado en Monte Palomar. Durante los tres años siguientes, Zwicky descubrió 12 supernovas en otras galaxias, cifra a comparar con las 21 que habían sido descubiertas accidentalmente durante el medio siglo precedente. Para cada supernova, Zwicky, con la colaboración de Walter Baade y Rudolph Minkowski, midió el cambio de brillo de la estrella durante un cierto tiempo y analizó con el espectroscopio la luz estelar.

El trabajo de Zwicky, a la búsqueda de supernovas en galaxias lejanas, debe destacarse, y ello tanto por su motivación cuanto por su productividad. Ya antes de que empezara sus trabajos sistemáticos de observación, avanzó, en 1933, que las explosiones de las supernovas eran estrellas que se estaban colapsando para reducirse a estrellas de neutrones. Idea que adelantó a los dos años, solamente, de haberse descubierto el neutrón. Afirmó, además, que las estrellas varían de composición cuando se colapsan y que emiten rayos cósmicos. Los 44 años transcurridos han demostrado que la intuición de Zwicky apuntaba directamente hacia los planteamientos correctos de las cuestiones, si bien las soluciones no pueden darse con nitidez, ni siquiera hoy en día.

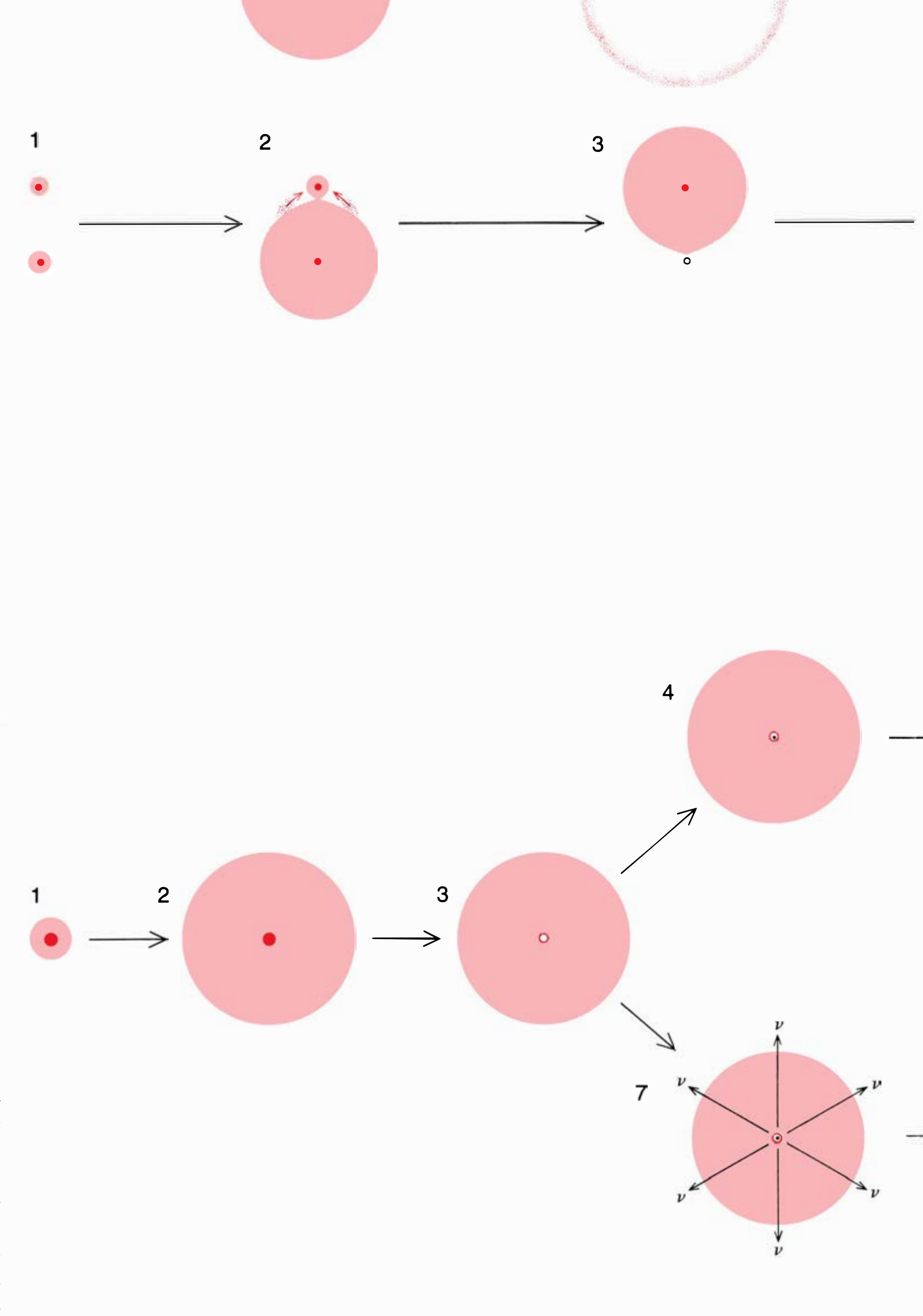
En 1937, Zwicky, gracias al telescopio Schmidt de 457,20 mm de Monte Pa-

lomar, descubrió una supernova de magnitud ocho en la cercana galaxia irregular IC 4128. Inmediatamente, Minkowski realizó una serie de observaciones espectroscópicas de la supernova, observaciones que proporcionaron lo más relevante de la información expectroscópica sobre supernovas hasta el reciente 1972. En ese año, se descubrió otra supernova brillante por Charles T. Kowal, de Cal Tech, en la cercana galaxia irregular NGC 5253. Se la designó por SN 1972e, por ser la quinta supernova observada en 1972. El grueso de la información sobre supernovas adquirido después del trabajo de Minkowski se basa en datos obtenidos de esta brillante supernova mediante las técnicas modernas de observación.

El sistema actual de búsqueda de supernovas no difiere substancialmente del empleado por Zwicky. Se escoge un conjunto de regiones del firmamento, a partir, generalmente, del número de galaxias existentes en cada región cuya proximidad a nuestra galaxia permite que las supernovas que en ellas hayan sean detectables. Noche tras noche, mes tras mes. se fotografían repetidamente las mismas regiones. Se superponen las placas fotográficas, o bien son cuidadosamente repasadas por parejas con la ayuda de un microscopio de destello, que pone en evidencia si ha aparecido una nueva estrella en alguna placa. Si se halla lo que se cree que es una nueva estrella, como suele suceder una vez cada pocos meses en una búsqueda normal, se acostumbra repetir la fotografía para estar seguros de no confundir un cataclismo estelar con un grano de polvo de la placa o un defecto microscópico de la emulsión.

Cuando el observador está seguro de que el objeto detectado es real, mide su posición, calcula su brillantez y envía un aviso por telegrama o teléfono al Central Bureau for Astronomical Telegram, de Cambridge, en el estado de Massachusetts. Desde Cambridge se envían telegramas a todos los observatorios del mundo, con la información más importante en código. Luego, los astrónomos interesados de otros observatorios descifran el telegrama y pueden empezar sus propias observaciones de la supernova.

El sistema no es perfecto. El tiempo que se requiere para que el primer observador haga la fotografía, examine la placa en busca de la supernova y repita la observación en la primera noche clara puede ser de varios días. El telegrama enviado, desde Cambridge a los otros observatorios, puede llegar un fin



LA EVOLUCION DE UNA SUPERNOVA es distinta para estrellas de masas diferentes. Una estrella, dotada de una masa sólo unas cuantas veces superior a la del sol *(fila de arriba)* fusiona hidrógeno en su núcleo dando helio (*color oscuro*) de un modo estable durante varios miles de millones de años (*1*). Cuando la mayor parte del hidrógeno se ha consumido, el núcleo de la estrella se contrae mientras que la parte exterior de la estrella se expansiona, y la estrella se transforma en una gigante roja (*2*). Las capas exteriores de la gigante roja pueden ser expulsadas por la estrella como nebulosas planetarias *(3)*, por ejemplo, la nebulosa anular de la constelación de Lira, quedándose lo demás como una estable enana blanca (*4*). Se cree que las supernovas del Tipo I son uno de los componentes de los sistemas llamados estrellas dobles (*segunda fila*), siendo su evolución al principio (*1 y 2*) igual a la evolución de una estrella que estuviera sola. Cuando llegan al estado de enana blanca (*3*), se transfiere, de repente, materia procedente de la estrella compañera (*4*), aumentando la ma-



teria de la enana blanca; ello provoca que su masa sobrepase el límite crítico de 1,44 masas solares. En ese instante, el núcleo de la enana blanca se colapsa violentamente desprendiendo energía como una supernova *(5)* y quedando un sistema binario compuesto de una estrella gigante ordinaria y de una fuente de rayos X *(6)*. Para una estrella dotada de una masa muy superior a la del sol *(filas tercera e inferior)*, ocurre algo distinto en la evolución de una supernova. Estas estrellas fusionan también hidrógeno en su núcleo dando helio, a lo largo de varios centenares de millones de años (*1*); cuando el hidrógeno está a punto de agotarse, se contrae el núcleo, se expansionan las capas exteriores de la estrella y ésta se convierte en gigante roja (*2*). El hidrógeno continúa quemándose en la capa *(color oscuro)* que envuelve al núcleo, mientras que éste se contrae hasta que alcanza el grado apto para fusionar helio *(blanco)* dando carbono *(3)*. Cuando el helio está a punto de agotarse, el núcleo empieza a quemar el carbono. Así, puede sobrevenirle a la estrella una de dos catástrofes. La misma ignición del carbono *(negro, 4)* puede producir inestabilidades, que detonarían la estrella como una supernova del Tipo II *(5)* no dejando nada más que una masa gaseosa en expansión *(6)*. O, si el carbono quema sin incidentes, las altísimas temperaturas del núcleo generarían neutrinos *(ν)* con intensidad creciente *(7 y 8)*, consumiendo la energía de la estrella y causando en su núcleo un colapso total. Un haz final de neutrinos se lleva gran parte del momento de rotación de la gigante roja, lo que haría explotar su envoltura. La explosión (*9*) dejaría un residuo gaseoso con un pulsar (*10*).

de semana o una noche, cuando no hay nadie para recibirlo. Con todo, cuando explota una supernova, su brillo suele aumentar con gran rapidez. Como nuestra respuesta a las supernovas es más bien lenta, son relativamente pocas las que han sido observadas antes de que alcancen su brillo máximo. Y este período inicial de su desarrollo es, en potencia, el de mayor importancia de cara a conseguir un mejor conocimiento de la naturaleza de las supernovas.

Las técnicas para registrar las galaxias en busca de supernovas están mejorando día por día. Un ejemplo es el programa de búsqueda en tiempo real, dirigido por Justin Dunlap en el Corralitos Observatory, de la Northwestern University, cerca de Las Cruces, estado de Nuevo México. Se programa un telescopio de reflexión de 610 milímetros para que se mueva rápida y automáticamente recogiendo observaciones de una serie de galaxias. Una exposición de unos cuantos segundos, con una cámara de televisión, produce una imagen de cada galaxia en una pantalla de televisión colocada en la habitación del observador. El observador compara la imagen con una imagen de referencia, comprueba si ha aparecido o no una nueva estrella y, luego, el telescopio se dirige hacia la galaxia siguiente.

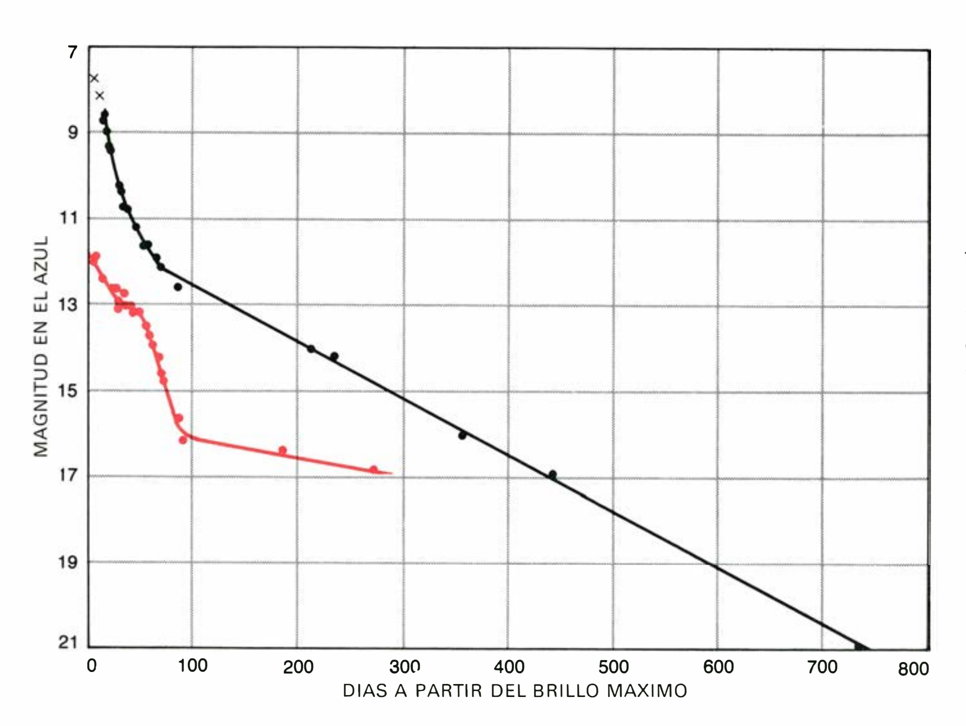
En el programa de busca en tiempo real de Dunlap, pueden controlarse centenares de galaxias cada noche, y, los resultados, se conocen al instante. Las galaxias escogidas están a una distancia que permite que cualquier supernova que aparezca en el interior de la misma sea fácilmente detectable antes de que alcance su brillo máximo. La eficacia de este sistema quedó demostrada en enero de 1975, cuando Dunlap descubrió una supernova en la NGC 2207, seis días antes de que alcanzara su resplandor máximo. Durante ese período, Halton C. Arp, en Palomar, y el autor, en el Observatorio Nacional de Kitt Peak, Arizona, sometieron a la supernova a un severo control. El futuro de la investigación del campo de las supernovas pertenece a los sistemas de detección que sean semiautomáticos o incluso enteramente automáticos.

Antes, cuando se descubría una supernova y había circulado la noticia de su existencia, el investigador interesado debía enfrentarse a un difícil dilema: ¿debería él obtener datos fotométricos, es decir, hacer mediciones cuantitativas del resplandor del objeto tal como se veía, utilizando una serie de filtros patrones? ¿O debería obtener datos espectroscópicos, es decir, hacer mediciones de la intensidad relativa de la luz de la estrella en distintas longitudes de onda? Hablando en general, pueden obtenerse rápida y fácilmente datos fotométricos precisos; para los espectros se necesita más tiempo, pero aportan mayor riqueza informativa. En la práctica, la opción del observador viene determinada a menudo por los instrumentos que el telescopio tiene incorporados en el momento en que el anuncio de la supernova llega al observatorio.

En los últimos años se han observado varias supernovas con el telescopio de 5080 milímetros de Palomar que tenía incorporado un nuevo instrumento que combina la precisión de la fotometría con el detalle de la espectroscopia. Ese instrumento, diseñado por J. Beverl Oke, de Cal Tech, es un espectrofotómetro multicanal. Dentro del espectrofotómetro hay 32 lámparas fotomultiplicadoras, que pueden medir rápidamente el resplandor de una supernova en cada una de las 100 o más bandas estrechas de longitudes de onda. La anchura de las bandas oscilan entre 20 y 360 angstroms; el instrumento es sensible a toda la gama de longitudes de onda que van desde los 3100 angstroms, en el ultravioleta, a los 11.000 angstroms, en el infrarrojo cercano. Los datos obtenidos con este instrumento por Arp y Oke, en colaboración con Leonard Searle, Michael Penston, Jesse L. Greenstein y James E. Gunn, constituyen la línea medular de la mayoría de los conocimientos que se han obtenido recientemente de las supernovas.

Desde el trabajo de Minkowski, en 1940, se viene dividiendo las supernovas en dos clases, en razón de sus espectros; se las denomina, respectivamente, clase Tipo I y clase Tipo II. Las supernovas de Tipo I forman un grupo muy homogéneo, con una variación relativamente pequeña entre el espectro de una estrella y el de la siguiente. Son el único tipo de supernova hallado en las galaxias elípticas; se creeque son muy viejas y se sabe que tienen muy pocas estrellas, si es que tienen alguna, cuya masa sea mayor que la del sol. De aquí que se suponga que las supernovas del Tipo I sean la explosión de una estrella cuya masa sea aproximadamente la de la masa solar.

Si se observa fotométricamente una



LAS CURVAS DE LUZ DE LAS SUPERNOVAS de Tipo I (*negro*) y de Tipo II (*color*) son completamente diferentes. La gráfica de las curvas de luz representa la disminución del brillo de la supernova, medida en términos de una escala logarítmica de magnitudes (cada magnitud figura un factor de unas dos veces y media en cuanto a brillo), dibujada a lo largo de un período de unos centenares de días. La curva de luz de la supernova, del Tipo I, SN 1972e muestra un fuerte descenso del brillo, seguida de un declive exponencial casi perfecto. Este comportamiento es típico de una supernova del Tipo I. La curva de luz de la supernova, del Tipo II, SN 1970g, descubierta en la galaxia M 101, nos da una gráfica mucho más compleja. Los puntos representan observaciones reales. Las observaciones se realizaron con un fotómetro y utilizando un filtro azul normal. En este caso, la supernova del Tipo II era mucho más tenue que la del Tipo I, pero ello no tiene porqué ser necesariamente así.

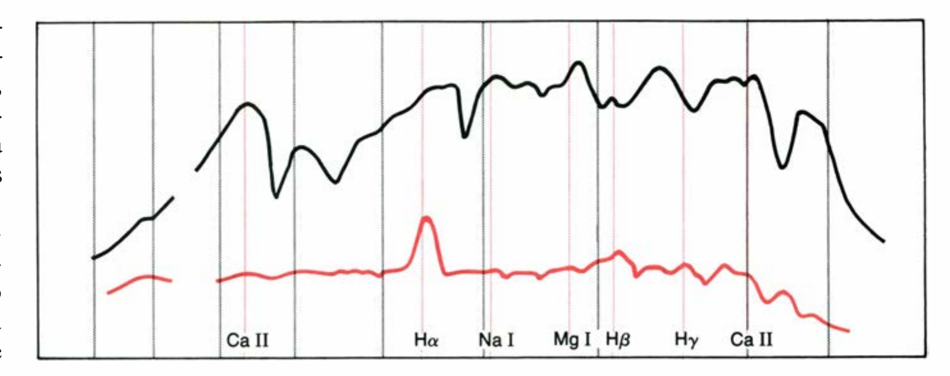
supernova del Tipo I a través de un filtro patrón *B* de luz azul, se ve que alcanza su brillo máximo a los pocos días, lo conserva durante otro período breve de pocos días más y luego se apaga rápidamente empleando para ello unos 30 días.

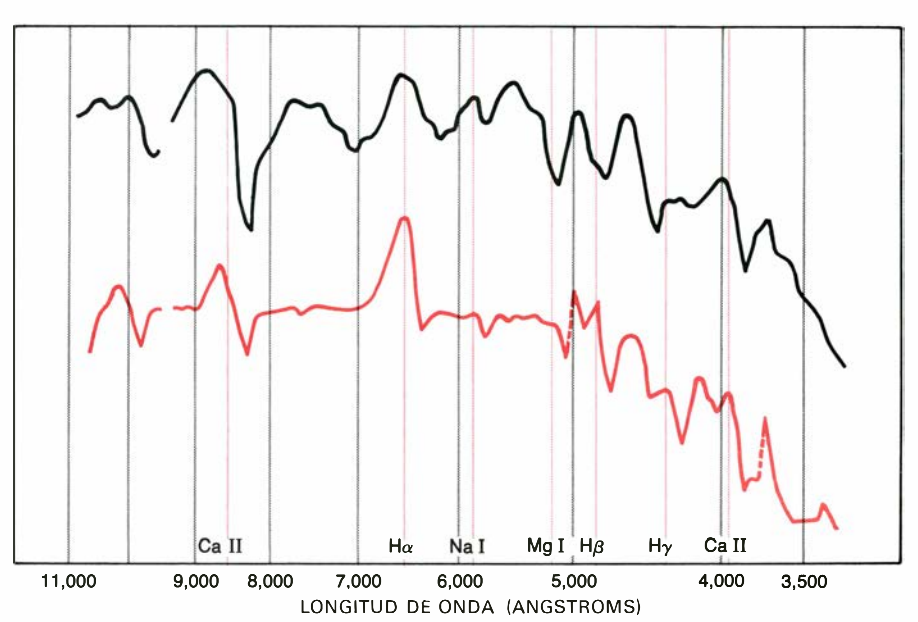
Después, una supernova del Tipo I decae según una curva que es casi exactamente exponencial. Alrededor del brillo máximo, el espectro de esta supernova se caracteriza por una fuerte línea de absorción de silicio ionizado con la longitud de onda de 6150 angstroms.

Las supernovas del Tipo II constituyen un grupo mucho menos homogéneo que las del Tipo I. Se encuentran principalmente en los brazos de las galaxias espirales, que tienen abundancia de estrellas jóvenes y masivas. De aquí que se suponga que una supernova del Tipo II sea una explosión de una estrella de masa mucho mayor que la del sol. Esta suposición parece confirmarse gracias a las mediciones espectrométricas de la intensidad de las líneas de emisión del hidrógeno en el material expulsado, lo que indica que la masa de lo expulsado es igual, por lo menos, a una masa solar. Si se observa fotométricamente una supernova característica del Tipo II a través de un filtro patrón *B*, también se ve que rápidamente alcanza su brillo máximo, permanece con él poco tiempo y luego decae rápidamente en unos 25 días. Con todo, su disminución posterior de brillo no es exponencial. En realidad, su brillo desciende hasta un tope en el que permanece entre 50 y 100 días. Después, decae aún más profundamente. Alrededor del máximo brillo de una supernova del Tipo II, el espectro de la estrella se distingue gracias a una fuerte línea de emisión del hidrógeno con la longitud de onda de 6563 angstroms.

Si las supernovas del Tipo I y del Tipo II proceden de clases de estrellas muy diferentes, ¿por qué los trazos iniciales de sus curvas luminosas son tan parecidos? Además, ¿qué es lo que está físicamente sucediendo en el interior de la estrella cuando se desarrolla la supernova? ¿Por qué una estrella, con una masa tan pequeña como la del sol, la cual podría terminar como una estable enana blanca, ha de explotar tan catastróficamente?

Las observaciones espectrofotométricas de un cúmulo de supernovas en otras galaxias han proporcionado abundante información sobre la temperatura real, la velocidad y composición de lo expulsado por la supernova, información que hace más comprensible la conducta de cada tipo de supernova.





LOS ESPECTROS DE LAS SUPERNOVAS de Tipo I (*negro*) y de Tipo II (*color*) también difieren. Las curvas representan la intensidad de la radiación en relación con la longitud de onda. Los picos corresponden a regiones del espectro en donde se está emitiendo energía; los valles son regiones en donde se absorbe energía. El par superior de curvas compara los espectros de SN 1972e (*negro*) y SN 1970g (*color*), poco después de haber alcanzado el máximo brillo; el par inferior de curvas compara sus espectros un mes después. El espectro de cada una de las supernovas también evoluciona con el tiempo. Las líneas espectrales son: *Ca II* es calcio ionizado; *Hα*, *Hβ* y *Hγ* son líneas emitidas por transiciones de electrones en el átomo de hidrógeno. *Na I* es sodio no ionizado y *Mg I* es magnesio no ionizado.

Debido a que la distribución de energía de las supernovas del Tipo II es más sencilla que la distribución de energía de las supernovas del Tipo I, empezaré con las del Tipo II. Una supernova representativa del Tipo II, de la que tenemos buenos datos, es la SN 1970g, que explosionó, en la galaxia M 101, a finales de 1970. Los análisis espectrofotométricos del espectro del objeto demuestran que, durante unos meses, éste evoluciona. En las primeras fases de la explosión, la distribución global de la energía de la estrella se parece mucho a la distribución continua de energía característica de un teórico cuerpo negro que estuviera a la temperatura de 12.000 grados Kelvin. Ahora bien, la energía emitida por unidad de área por un eficaz radiador incandescente, que se comporte como un cuerpo negro, depende solamente de su temperatura. Además, se puede medir el flujo de radiación de la supernova cuando su brillo es máximo. De modo que si suponemos la distancia de la supernova, o la conocemos, a partir de otras mediciones, una combinación de la temperatura y del flujo de radiación observado puede darnos un cálculo del radio de la estrella en el instante en que alcanza su brillo máximo. Para la SN 1970 g, el radio fue de 3×10^{14} centímetros, un radio tan grande como el de la órbita del planeta Urano.

Una vez conocido el radio de la supernova, también puede determinarse su luminosidad absoluta. Para la SN 1970g, la luminosidad fue de 10^{42} ergios por segundo, mil millones de veces más que la luminosidad del sol. Aún más interesante es que, a partir de los datos espectrofotométricos y de los fotométricos de

banda ancha normales, podamos dibujar un gráfico de la variación del radio de la supernova con el tiempo. Durante unos 30 días después de la explosión inicial de la estrella, el radio de la superficie desde la que se emite la luz visible aumenta con una velocidad casi constante de 5000 kilómetros por segundo. Al final de este período, la fotoesfera de la estrella, es decir, la superficie visible, alcanza un radio de unos 2×10^{15} centímetros, radio mucho mayor que el del sistema solar. Cuando la fotoesfera se expansiona, la temperatura desciende a unos 6000 grados K. Después de alcanzar su máxima extensión, la fotoesfera, que hasta entonces es opaca, se hace tan delgada que se torna transparente. De modo que el radio aparente de la estrella empieza a contraerse, provocando un rápido descenso en la curva luminosa de una supernova del Tipo II.

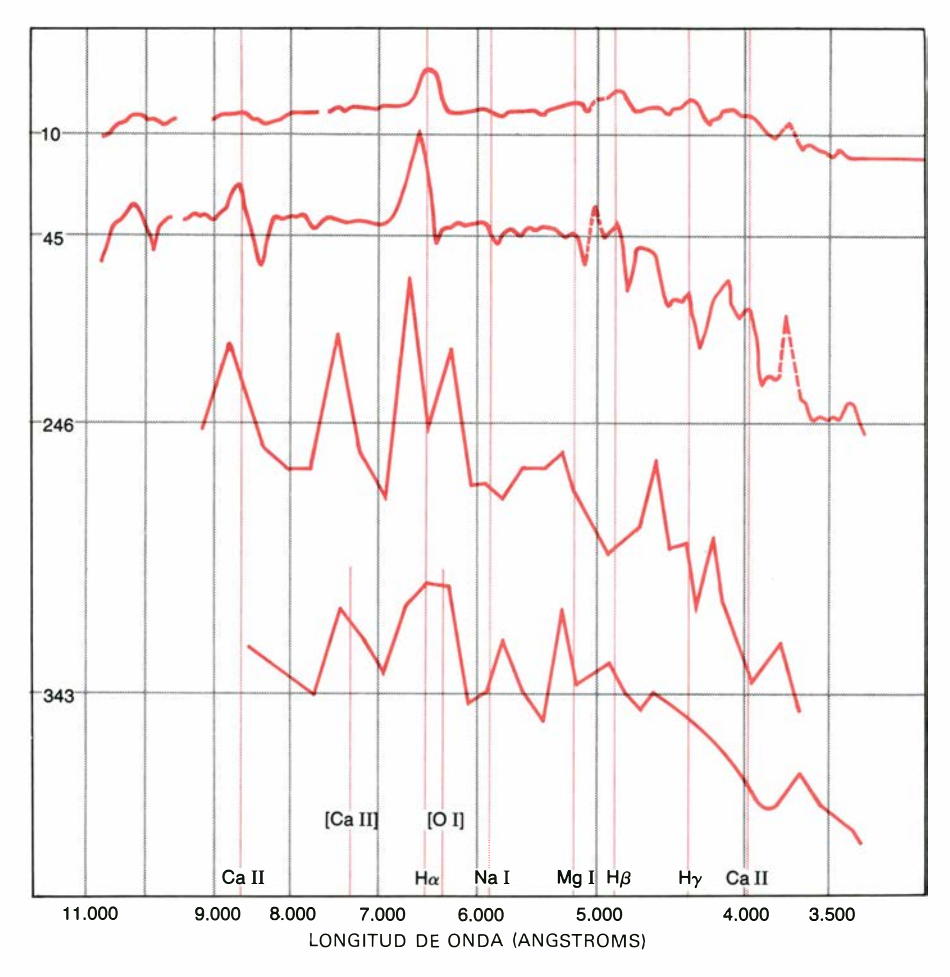
Modelos teóricos plausibles de las supernovas del Tipo II han sido desarrolladas por W. David Arnett y Sidney W. Falk, de la Universidad de Texas, e independientemente por Roger A. Chevalier, de Kitt Peak. Estos modelos se desentienden completamente de las causas de la explosión de la supernova, pero reproducen fielmente los efectos observados. En su lugar, ellos suponen que, sin entrar en los detalles de lo que ocurre en lo más profundo de la estrella, la explosión evidentemente calienta y acelera las capas exteriores de aquélla. Arnett, Falk y Chevalier consideran sólo los efectos de la onda del choque resultante de la explosión en su recorrido desde el cuerpo de un modelo plausible de estrella a través de las caoas exteriores de la estrella. Escogen como modelo de estrellas el de rojas supergigantes, que son estrellas con una masa varias veces mayor que la del sol y con un volumen millones de veces superior. Estas rojas supergigantes se hallan en el momento final de su ciclo vital como generadores de energía termonuclear.

Este modelo de supernovas tiene dos importantes características que coinciden con las características de las supernovas observadas. Primera, los cálculos demuestran que las rojas supergigantes tienen ya tal magnitud que no se enfrían de un modo significativo cuando se expansionan hasta alcanzar aproximadamente el tamaño del sistema solar. Segunda, el interior de una extensa roja supergigante es una gran región con densidad casi constante; de aquí que la explosión que ocurre en el centro de la estrella transmita eficazmente su energía a la superficie. Por tanto, el modelo predice que la energía liberada en el centro de la estrella puede ser la causa del calor y del movimiento que se observan realmente en la superficie de la supernova. El modelo predice además que la supernova debería tener una temperatura de unos 10.000 grados K en la superficie y que debería expansionarse a una velocidad de unos 5000 kilómetros por segundo poco después de alcanzar su brillo máximo. Resulta estimulante comprobar que los cálculos basados en modelos de estrellas que parece lógico que exploten coincidan tan bien con las observaciones de estrellas que explotan realmente. Recíprocamente, el hecho de que la coincidencia provenga de consideraciones relacionadas con la estructura del interior de la estrella y no de cálculos de los detalles de la explosión, significa que los datos espectrofométricos obtenidos de la explosión de una supernova, durante el primer mes, aportan escasa información directa sobre la causa de la energía liberada en el centro de la estrella.

¿Cómo hay que comparar las observaciones y la teoría de las supernovas del Tipo II con las supernovas del TIpo I? Una supernova representativa del Tipo I bien observada, la SN 1972e, fue descubierta por Kowal en la galaxia NGC 5253. Las observaciones espectrofotométricas se consiguieron con dos aparatos de Monte Palomar: el espectrofotómetro multicanal adaptado al telescopio de 5080 milímetros y un analizador sencillo adaptado al telescopio de reflexión de 1524 milímetros. Las dos series de análisis mostraron que la distribución global de la energía de una supernova de Tipo I no es muy diferente de la distribución de energía de una supernova de Tipo II.

A diferencia del fondo continuo del espectro de una supernova de Tipo II, y ni siquiera los primeros días después de la explosión, el continuo de esta supernova de Tipo I no era perfecto. Se hallaba perturbado por unas anomalías muy pronunciadas, en emisión y en absorción.

Con todo ello, la distribución global de energía del espectro correspondía a la



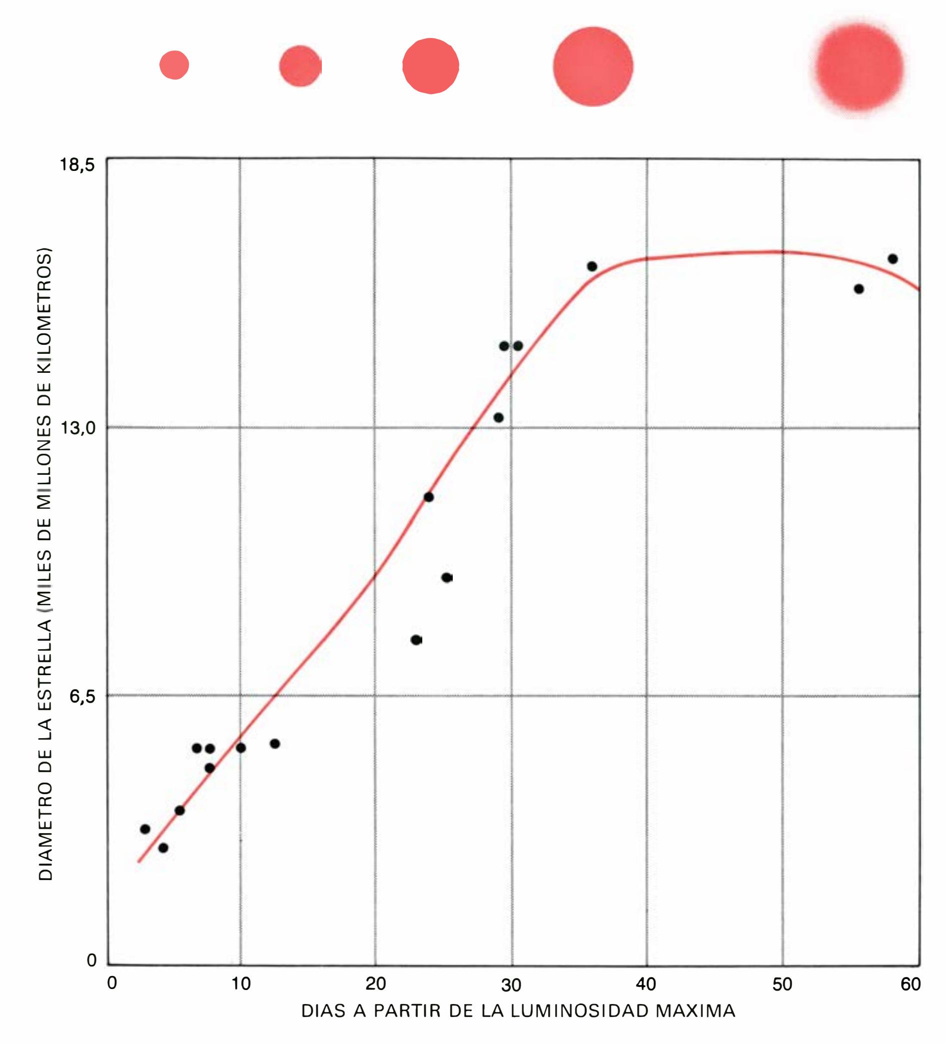
EVOLUCION DEL ESPECTRO SUPERNOVA DEL TIPO II, para SN 1970g en M 101. Los números de la izquierda son días transcurridos desde que la estrella alcanzó el brillo máximo. El pico del gráfico señalado como |*O I*| indica la evolución de una línea de emisión de oxígeno no ionizado, algunos meses después de haber ocurrido la gran explosión.

de un cuerpo negro que estuviera a una temperatura de 10.000 grados K. Igual que para las supernovas del Tipo II, las del Tipo I se enfrían rápidamente conforme la fotoesfera se va expansionando. El enfriamiento reduce la energía de la región ultravioleta del espectro más rápidamente que la del infrarrojo, hasta que la fotoesfera alcanza una temperatura de unos 6000 grados. A partir de aquí, la estrella comenzó a apagarse mientras permanecía a una temperatura constante; la superficie visible de la estrella empezó a contraerse. Ese fue el momento en que el brillo de la supernova inició su descenso exponencial.

Para ambos tipos de supernovas, el estudio de la distribución de la luz en el fondo continuo del espectro de la estrella suministra importantes claves para la identificación correcta de las líneas del espectro. La temperatura, deducida del equiparamiento del continuo con el espectro de un cuerpo negro a una cierta temperatura, nos sirve de orientación sobre qué tipos de líneas espectrales pueden esperarse. En el espectro de las supernovas de Tipo II se ven fuertes líneas de hidrógeno. Además, hay líneas fuertes de emisión y absorción de calcio ionizado, de sodio y magnesio no ionizados y una mezcla de líneas debidas al hierro ionizado. La intensidad de las líneas indica que la abundancia relativa de estos elementos en la supernova no es muy diferente de su abundancia en el sol. Si, en el curso de la explosión, la supernova sintetiza elementos pesados además de elementos ligeros, no se observa ninguno de ellos en un principio entre restos en rápida expansión.

Los espectros de las supernovas del Tipo I son más difíciles de analizar. De hecho, no hay acuerdo unánime sobre si el espectro observado de una supernova de Tipo I está compuesto, principalmente, de líneas de emisión, de líneas de absorción o de ambas. Con todo, parece probable que los rasgos de emisión ancha, que caracterizan al espectro cerca del punto de brillo máximo de la estrella, correspondan a muchos de los átomos e iones vistos en los espectros de emisión y de absorción de las supernovas del Tipo II. Tal vez, el hecho de que las líneas distorsionen el fondo continuo del espectro puede explicarse si se ha potenciado la abundancia de estos elementos con respecto a la abundancia del hidrógeno, durante la evolución presupernova de la estrella o bien durante la explosión.

Los espectros de las supernovas del Tipo I cambian cualitativamente en el

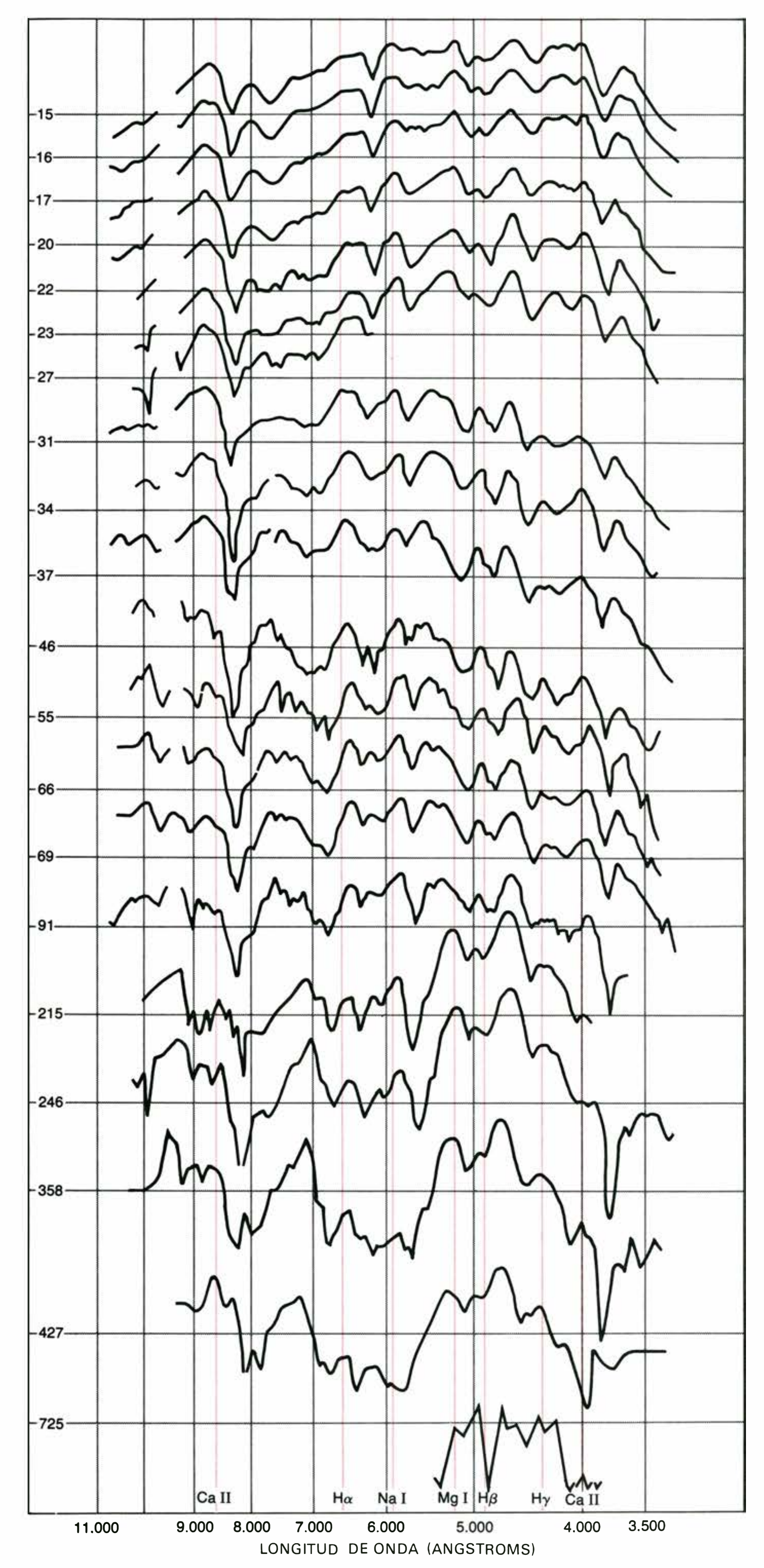


EL CAMBIO DE RADIO DE LAS SUPERNOVAS puede medirse tomando como unidad mil millones de kilómetros. Dos meses después de la explosión de esta estrella (SN 1969l en la galaxia NGC 1058), el tamaño alcanzado era mucho mayor que el del sistema solar. Fue entonces cuando las capas más exteriores de la estrella se hicieron transparentes y cuando la superficie visible de la estrella parecía contraerse. Estas mediciones, unidas a otras informaciones, determinan la distancia que hay de nuestra galaxia a la supernova.

mismo instante en que la curva de luz que nos da la disminución del brillo pasa a ser exponencial. Antes del declive exponencial, domina el espectro del flujo del continuo y las líneas de emisión y absorción individuales se superponen al fondo continuo. No obstante, cuando empieza la disminución exponencial, el continuo no tiene excesiva importancia y el espectro resulta dominado por un grupo de cuatro líneas de emisión fuertes.

Se han avanzado dos explicaciones de la presencia de estas líneas. Philip Morrison, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Leo Sartori, de la Universidad de Nebraska, han propuesto que las líneas de emisión proceden del hecho de que, en un cierto instante de la explosión de la supernova, la estrella emite un enorme pulso de radiación ultravioleta. La luz visible observada desde la tierra se debería entonces a la emisión de los átomos de helio que hay alrededor de la estrella y que la radiación ultravioleta ha transformado en fluorescentes. Esta hipótesis presupone que debería haber una línea de emisión fuerte de helio a la longitud de onda de 4686 angstroms y que la intensidad de esta línea debería disminuir exponencialmente durante un largo período de tiempo. Todavía no se sabe si, efectivamente, una supernova del Tipo I emite esta clase de pulso en el ultravioleta, ni tampoco si el gas que rodea la estrella tiene las propiedades que serían necesarias para justificar la fluorescencia.

La segunda explicación de las líneas de emisión del espectro de las supernovas del Tipo I procede de un intento por definir el origen de las cuatro líneas fuertes. Oke y el autor propusieron que este aspecto se debía a una mezcla de líneas emitidas por el hierro ionizado.



La suma de las 216 líneas del hierro que tienen más probabilidad de ser emitidas por el material en explosión da un resultado muy parecido para tres de las cuatro líneas fuertes de emisión, observadas en el espectro de las supernovas de Tipo I. La cuarta línea, con una longitud de onda de 4600 angstroms, es la más fuerte. Charlotte Gordon, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, del International Business Machines Corporation, ha sugerido que la línea en cuestión podría venir motivada por el hierro doblemente ionizado. Si nuestra descripción de las líneas es correcta, la cantidad de hierro en la envoltura gaseosa expulsada por una supernova del Tipo I es 20 veces mayor que la cantidad de hierro que hay en el sol. Si la supernova del Tipo I es la explosión de una estrella dotada de una masa parecida a la del sol, nuestra interpretación postula que el material expulsado se haya enriquecido en hierro de un modo sustancial.

Aun cuando nuestra descripción de las líneas no sea correcta, el hecho de que, durante el tiempo en que la supernova disminuye su brillo exponencialmente, aparezcan en su espectro líneas de emisión, significa que hay energía que fluye hacia el material expulsado. Si no hubiere energía fluyendo hacia él, la energía radiada por el gas, a la longitud de onda de las líneas de emisión, enfriaría rápidamente dicho material y las líneas de emisión decaerían rápidamente. No obstante, para la SN 1972e, las líneas de emisión persistieron al menos durante dos años. Durante ese tiempo, debe haber llegado a la materia expulsada energía con una intensidad que había ido disminuyendo exponencialmente, tal como ocurría con el brillo total de la supernova. ¿Cuáles son las fuentes posibles de esa energía?

Una fuente continua podría ser la radiactividad de algún isótopo o grupo de isótopos, cuya vida media oscilara entre 50 y 70 días. Durante los años 1950, Baade, Geoffrey Burbidge, E. Margaret Bur-

EVOLUCION de una supernova perteneciente al Tipo I, mostrada a través de la SN 1972e durante un período de casi dos años. En la fase tardía del desarrollo de la estrella, el espectro está dominado por cuatro líneas de emisión fuertes sin identificar, entre las longitudes de onda de 4000 y 6000 angstroms. Las líneas de emisión significan que, de alguna manera, se continúa suministrando energía al gas que rodea a la supernova, mucho después de la explosión. La energía podría proceder de algún material radiactivo.

bidge, Fred Hoyle, Robert F. Christy y William A. Fowler propusieron que el isótopo era el californio 254. La hipótesis de radiactividad, fuese el isótopo radiactivo el californio o lo fueran otros, ha ido reapareciendo periódicamente. El calor intenso, la presión y el bombardeo causado por los neutrones en el centro de la supernova podrían producir, ciertamente, elementos pesados radiactivos y podrían crear el hierro suplementario que puede existir en la envoltura de una supernova del Tipo I.

Otra fuente continua de energía que puede mantener la luz de las líneas de emisión es el pulsar. Se sabe, por ejemplo, que la nebulosa del Cangrejo, en la constelación de Toro, es un residuo de la explosión de una supernova que fue observada por los astrónomos chinos, en el año 1054. También se sabe que en el centro de la nebulosa hay un pulsar, es decir, una estrella de neutrones que gira rápidamente y que está emitiendo grandes cantidades de energía en las regiones de rayos X, de luz visible y de radio del espectro. Ya que la estrella de neutrones, que gira, emite tanta energía, debe estar frenando; la intensidad del frenado indica que la cantidad de energía emitida se corresponde con la cantidad emitida por toda la nebulosa del Cangrejo. Parece razonable deducir que, a los pocos años inmediatamente posteriores a la explosión, la energía perdida por el pulsar haya suministrado la potencia necesaria para la observación de las líneas espectrales de emisión.

No se ha encontrado ningún pulsar que sea más joven que el de la nebulosa del Cangrejo. No obstante, el material expulsado por una supernova podría haber ocultado, durante un tiempo considerable, la existencia de una estrella de neutrones, que gire, en el centro de la supernova. Si los residuos que rodean al pulsar tardan en apartarse, la ausencia de pulsaciones rápidas procedentes de los restos de supernovas ajenas a nuestra galaxia no puede tomarse como una prueba evidente contra la formación de pulsars en tales sucesos.

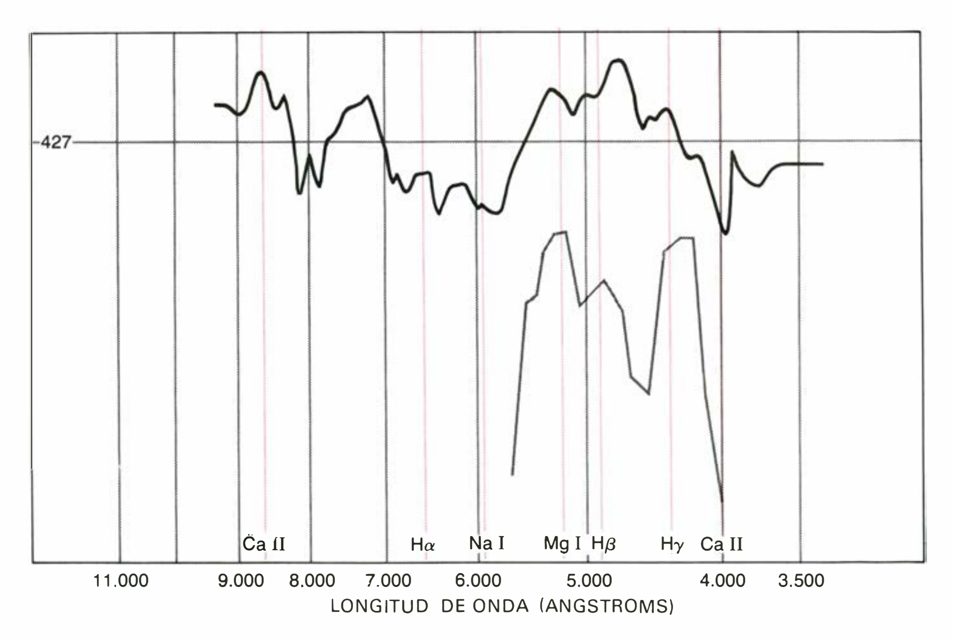
Hasta aquí hemos ido comparando las observaciones de supernovas en otras galaxias con modelos teóricos de supernovas, sin fijarnos en el problema de porqué una estrella puede explotar de forma tan catastrófica. Son bastantes los teóricos que han intentado idear modelos estelares que describen no sólo la explosión sino también la historia de la vida de la estrella hasta ese instante.

De un modo general, el destino de una estrella depende de su masa. Cuando una estrella empieza a existir, el gas a partir del cual se está formando se contrae y se calienta, convirtiéndose su energía de gravitación en energía térmica. Cabe que la temperatura existente en el centro del gas alcance un grado suficientemente alto, de forma que permita la fusión de núcleos de hidrógeno por medio de reacciones termonucleares. A partir de ese punto, la estrella atraviesa un período, largo y estable, en el que quema hidrógeno. Al cabo de un tiempo, el combustible hidrógeno del centro de la estrella se agota. El núcleo se contrae todavía más, bajo la influencia de su propia gravedad, en tanto que el hidrógeno continúa quemándose en la capa que envuelve al núcleo. Mientras tanto, las capas exteriores de la estrella se expansionan y ésta se convierte en una estrella roja gigante.

Para estrellas con una masa no superior a unas cuantas veces la masa del sol, ésa es, a grandes rasgos, la historia. Cuando el hidrógeno de la capa que envuelve al centro original se consume, cesan las reacciones termonucleares dentro de la estrella. La estrella no tiene suficiente masa para continuar su colapso y calentarse más. Las fuerzas gravitatorias quedan completamente equilibradas con las fuerzas electrostáticas entre los electrones del núcleo, frío y denso; la estrella permanece estable. Las capas exteriores de la roja gigante se apartan de la estrella con relativa lentitud, formando una nebulosa planetaria, como la de la nebulosa anular de Lira; la estrella sigue perviviendo durante miles de millones de años como una enana blanca que irradia débilmente.

Las estrellas con una masa mucho mayor pueden continuar colapsándose. Su centro se calienta hasta que pueden reanudarse las reacciones termonucleares, siendo esta vez los núcleos de helio los que se fusionan para producir carbono. Cuando el helio se consume, a su vez, el centro se colapsa más y los núcleos de carbono se fusionan produciendo elementos más pesados todavía.

Los modelos predicen que en estas estrellas de gran masa pueden ocurrir dos clases alternativas de catástrofes, y ser ellas la causa de supernovas del Tipo II. En el primer caso, la combustión del carbono puede conducir a inestabilidades dentro del núcleo, que provocan la explosión de la estrella. Ello puede deberse a que la intensidad con la que se genera energía en las reacciones termonucleares sea extremadamente sensible a la temperatura. Bajo ciertas condiciones, la ignición del carbono puede aumentar la temperatura en el centro y, por tanto, aumentar la intensidad con la que el carbono se quema. Una mayor intensidad de combustión aumenta todavía más la temperatura, lo que, a su vez, vuelve a incrementar la intensidad de la combustión. Si no interfiere ningún otro mecanismo, el proceso se dispara rápidamen-



TRES DE LAS CUATRO LINEAS DE EMISION del espectro de SN 1972e (*dibujado en la página anterior*) **pueden deberse a la emisión procedente de átomos de hierro ionizados, según la identificación hecha por el autor y J. Benerley Oke. La curva superior es afín a la última curva espectral de SN 1972e, dibujada en la página precedente. La curva inferior es el espectro calculado de hierro formado con la combinación de 216 líneas de emisión. No obstante, la línea de emisión por explicar aún es la más intensa de las cuatro líneas consideradas.**

te, quemándose todo el carbono de la estrella en un tiempo muy corto. Un proceso catastrófico de esta índole en el centro de una gigante roja puede determinar la clase de supernovas que estamos observando. No obstante, el modelo presenta una dificultad: predice que debería destruirse toda la estrella sin que quedara resto estelar alguno, fuera del tipo que fuere.

En el segundo caso, la estrella puede trascender la ignición del carbono sin que ocurra ningún cataclismo. La estrella poseería entonces un núcleo extraordinariamente caliente, que produciría grandes cantidades de neutrinos. Al carecer los neutrinos de masa y de carga eléctrica, e interaccionar débilmente con la otra materia, todos ellos pueden escapar de la estrella, hurtándole mucha energía. De este modo, al perder energía, el núcleo se contrae y se calienta todavía más. De nuevo, la intensidad con la que se crean los neutrinos aumenta con la temperatura. Cuanta más energía van hurtando los neutrinos, más grados va elevándose la temperatura hasta que, por último, se precipita en el colapso total. Hacia el final del colapso, puede emitir un destello final de neutrinos de alta energía. Cuando este destello atraviesa la envoltura exterior de la estrella puede transmitir un momento suficiente, del núcleo a la envoltura, para provocar la explosión de las capas exteriores y originar una supernova. Mientras tanto, la única fuerza que queda para evitar el colapso completo del núcleo es la fuerza fuerte, que actúa entre los núcleos atómicos. Si esta fuerza puede frenar el colapso, el centro se reducirá a una estrella de neutrones, que es un objeto extraordinariamente denso y estable.

Esta alternativa nos llevaría a la formación natural de una estrella de neutrones en la muerte de cada estrella masiva. No obstante, los mejores cálculos hechos hasta ahora de lo que ocurre en el núcleo de una estrella que se colapsa, demuestran que no se forma una estrella de neutrones. Lo que sí se descubre es que el núcleo se colapsa continuamente hacia un agujero negro, uno de esos objetos extraños postulados, de los que ni la luz puede escaparse. Pero la naturaleza hace caso omiso de los problemas de los teóricos. Existe, por supuesto, una estrella de neutrones en el centro de la nebulosa del Cangrejo; también está claro que la nebulosa es el residuo de la explosión de una supernova; por tanto, algunas supernovas, por lo menos, producen estrellas de neutrones.

La serie de sucesos que conducen a una supernova del Tipo I está envuelta en un misterio mayor que el que rodea a la que conduce a una del Tipo II, ya que se espera que la supernova del Tipo I sea la explosión de una estrella cuya masa sea afín a la del sol. Puesto que una tal estrella tiende a quedarse estacionaria en la forma de enana blanca, algo inesperado debe suceder para que explote como una supernova. En general, se parte de la hipótesis de que una estrella que da lugar a una supernova del Tipo I es miembro de un sistema binario, o sea, es una estrella doble. Bajo ciertas condiciones, cuando una estrella de esta clase se convierte en enana blanca, puede incorporar grandes cantidades de materia procedente de su compañera. La nueva materia puede aumentar la masa de la enana blanca hasta sobrepasar el límite crítico de 1,44 masas solares, punto a partir del cual la estrella puede empezar a colapsarse. No está claro el proceso por medio del cual la estrella da lugar a una supernova, pero sí es cierto que el colapso de la enana blanca debe liberar la cantidad de energía observada en una supernova del Tipo I. Todavía hoy no se sabe si esta descripción teórica corresponde o no a lo que sucede realmente en una supernova observada del Tipo I.

La reunión de los dos hechos siguientes: que en el núcleo de una estrella presupernova se creen elementos pesados y que la supernova explote tan catastróficamente, ha inducido la hipótesis de que las supernovas sean las responsables del enriquecimiento en elementos pesados del gas existente entre las estrellas. El gas interestelar es, originariamente, hidrógeno y helio, pero tiene trazas en cantidades significativas de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. Además, al amparo del calor y la violencia de la explosión de una supernova, puede generarse un inmenso flujo de neutrones capaz de transformar el hierro en los elementos más pesados. Si los elementos pesados del gas interestelar se originan de esta manera, resulta probable que las supernovas sean las responsables de los elementos pesados que hay en el sol, en la tierra y en los organismos vivos que habitan ésta.

Una importante prueba directa de esta hipótesis la aportan los meteoritos. Se cree que ciertos meteoritos son trozos de materia procedentes del tiempo en que el sol y los planetas no eran más que una nube de polvo y gas. Un examen detallado de la composición de estos meteoritos muestra que contienen algunos de los productos de desintegración de núcleos radiactivos de una vida relativamente corta. Por ejemplo, el yodo 129 tiene una vida media de 17 millones de años; su

producto de desintegración, el gas inerte xenón 128, se encuentra incrustado dentro de los meteoritos. Esta observación implica que el yodo radiactivo debía estar presente cuando se formó el meteorito. Esta deducción implica, a su vez, que el material que estaba destinado a constituir el sistema solar contenía una provisión reciente de yodo radiactivo. Probablemente, alguna supernova, en un lugar cercano al naciente sistema solar, creó el yodo radiactivo, lo expandió dentro del gas interestelar e incluso, tal vez, provocó la formación del sistema solar. Sea cierta o no esta concatenación de razonamientos, la presencia de isótopos en los meteoritos es una prueba notable de que se estaban formando elementos por la era en la que el sistema solar se estaba gestando.

Hay otros dos casos observacionales que prueban la síntesis de elementos pesados en las explosiones de supernovas: la nebulosa del Cangrejo y un residuo de supernova en Casiopea, a la que se da el nombre de Casiopea A. En la nebulosa del Cangrejo, la proporción de helio respecto a hidrógeno parece ser mayor que la que hay en otras regiones de la galaxia. En la Casiopea A, el oxígeno, el azufre y el argón son más abundantes de lo normal en relación con el hidrógeno. Pudiera ser que los procesos nucleares de la supernova que dan lugar a la presencia de estos residuos fueran los responsables de esta sorprendente abundancia de elementos pesados.

Las supernovas pueden ser también la causa de la producción de rayos cósmicos. Partículas de gran energía procedentes de lugares que no pertenecen al sistema solar bombardean la tierra incesantemente, algunas de ellas con energías mayores que las de las partículas que se producen en los más potentes aceleradores construidos por el hombre. Si multiplicamos la energía de las partículas de los rayos cósmicos por la densidad de las partículas, la energía total es comparable a la que se obtendría sumando toda la energía luminosa de las estrellas de la galaxia. ¿Cuál puede ser el origen de estas partículas dotadas de tanta energía?

Las supernovas han venido siendo una respuesta posible a esa pregunta, desde que Zwicky lo insinuara en 1933. S. A. Colgate, del New Mexico Institute of Mining and Technology, y sus colaboradores, han puesto de manifiesto que, a medida que la poderosa onda de choque, producida por la explosión del núcleo de una supernova, avanza a través de las capas exteriores de la estrella, la densidad de la materia que les sale al paso se va reduciendo progresivamente. En su opinión, cuando la onda de choque llega a capas de una densidad relativamente baja, su enorme energía se traspasa a una cantidad de masa tan pequeña que cada uno de los núcleos es acelerado hasta alcanzar velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

John Scott y Chevalier han propuesto otra hipótesis, según la cual las supernovas podrían crear rayos cósmicos; se basan en sus investigaciones del residuo de la supernova Casiopea A, que es el objeto más brillante del firmamento en la zona radio. Las emisiones radio del objeto proceden de partículas que se mueven dentro de un campo magnético a una velocidad próxima a la velocidad de la luz. Las observaciones visuales de Casiopea A muestran que hay unas pequeñas nubes de gas que se mueven en ella a una velocidad de unos pocos miles de kilómetros por segundo, velocidad característica del material expulsado por una supernova. Scott y Chevalier afirman que las nubes excitan los campos magnéticos que hay dentro del residuo de supernova, y ellos, a su vez, aceleran las partículas hasta las energías características de los rayos cósmicos.

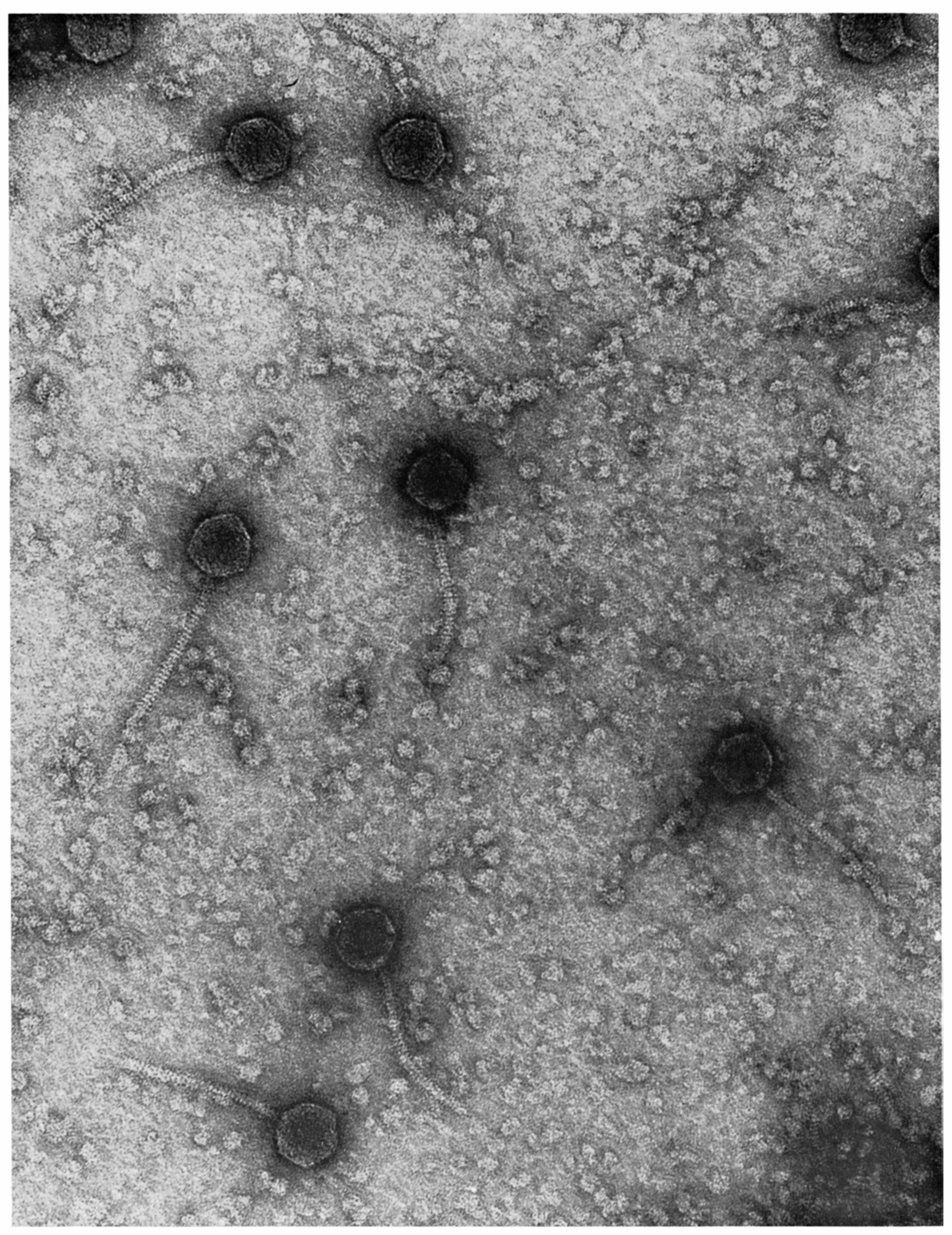
Las supernovas se encuentran también en una situación única para ayudar a obtener la escala de distancias del universo. La técnica de la espectrofotometría nos da la temperatura de la superficie de la supernova y la cantidad de energía, recibida en la tierra, de la estrella que explota. La cantidad de energía emitida desde la superficie de una estrella que está a una temperatura dada depende sólo de la extensión de la superficie, que es proporcional al cuadrado del radio. Y la energía recibida en la tierra depende sólo de la cantidad total de energía emitida por la estrella y del inverso del cuadrado de la distancia entre la tierra y la estrella. De modo que la temperatura de la estrella y la anergía recibida en la tierra dan el cociente entre el radio y la distancia de la estrella. Las mediciones del efecto Doppler permiten calcular a qué velocidad se expansiona la estrella. Si se sacan dos series de datos de la supernova, separadas por unas cuantas semanas, se puede saber lo que ha aumentado el radio de la estrella. Conociendo esta distancia y el cociente entre ella y la distancia a la tierra, puede calcularse inmediatamente la distancia de la estrella.

Aunque hay varias indeterminaciones en la aplicación detallada de esta técnica, propuesta primeramente por Searle, tiene la singular propiedad de ser una medida de distancias extragalácticas completamente independiente de la escala de distancias normal, la cual se basa en determinaciones de distancia hechas en nuestra propia galaxia. John Kwan y el autor hallaron que, para las dos supernovas, SN 19691 en NGC 1058 y SN 1970g en M 101, las distancias calculadas con esta técnica coinciden bastante bien con la escala de distancias extragalácticas deducida según la vía clásica por Allan Sandage y Gustav A. Tamman, de los observatorios Hale. Aunque se necesita probarlo en más casos y con mejores modelos de supernovas, el método parece muy prometedor como indicador de distancias extragalácticas.

El recuento de las supernovas extragalácticas proporcionará una estimación de la frecuencia con la que ellas explotan en nuestra propia galaxia. Parece razonable una frecuencia de una cada 50 años, más o menos. Tycho Brahe observó una supernova en 1572 y Johannes Kepler observó otra en 1604. El estudio detallado de las nubes de Casiopea A, hecho por Sidney van den Bergh, del observatorio David Dunlap, de la Universidad de Toronto, concluye que explotó hacia 1667, aunque ni Isaac Newton ni nadie de su tiempo lo registrara.

Seguramente la supernova que creó el residuo Casiopea A era más entenebrecida que las otras y quedaba algo oscurecida por el polvo interestelar. No hay ninguna prueba de que haya explotado otra supernova en nuestra galaxia durante los últimos 300 años.

¿A qué se parecerá la próxima supernova? ¿Será como la supernova de la nebulosa del Cangrejo, visible en pleno día y, tal como anotaron los chinos, "de la longitud de una estera"? ¿O será como la supernova Casiopea A, invisible y monótona? Van den Bergh, que calculó el número de estrellas de la galaxia a distintas distancias de la tierra y la esperada extinción de su luz por el polvo interestelar, ha esbozado su teoría estadística. Los resultados a que ha llegado indican que, aunque la nueva supernova sea muy brillante, cabe la posibilidad de que se trate de una nueva estrella disimulada en medio de la polvorienta Vía Láctea, en donde no podría distinguirse de ninguna manera. Cuando explote la próxima supernova en nuestra galaxia tal vez consigamos detectarla no por su luz sino por el intenso destello de neutrinos que envía, por los rayos gamma emitidos por los elementos radiactivos pesados que ella sintetiza o por el pulso de ondas gravitacionales originado por el colapso de su núcleo.



VIRUS BACTERIANOS, o fagos, pertenecientes al denominado fago lambda, observados a 200.000 aumentos. Micrografía electrónica realizada por William C. Earnshaw y Philip A. Youdarian, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Cada partícula vírica tiene una cabeza icosaédrica, en cuyo interior se encuentra una molécula de ADN vírico y una cola, hueca y flexible, que sirve para fijarse a la membrana exterior de la célula bacteriana huésped e inyectar su ADN en el interior de la misma. La tinción negativa con acetato de uranilo muestra claramente las subunidades que forman la cubierta proteica del virus. Se observa, además de los bacteriófagos, abundantes ribosomas bacterianos procedentes de la enterobacteria *E. coli*, de la que se han obtenido los virus *(partículas ligeramente teñidas dispersas en todo el campo).*

Inserción del ADN vírico en el ADN de la célula huésped

Algunos virus coexisten con su célula huésped durante largos períodos sin causarle daño alguno, incorporando sus genes en el cromosoma huésped. Los detalles del mecanismo de inserción vírica están perfectamente establecidos

Allan M. Campbell

A menudo, la medicina considera a los virus como entidades biológicas agresivas predispuestas al exterminio del hombre. Actualmente, su papel en la enfermedad se considera como el resultado de su existencia parásita. Incapaces de reproducirse por sí mismos, los virus invaden las células vivas y dirigen parte de la maquinaria celular hacia la producción de nuevas partículas víricas. Durante el proceso, muchas células huéspedes se destruyen, dañando al tejido del que forman parte y manifestándose la enfermedad como consecuencia del mismo.

Aunque la producción de los virus y la destrucción celular son las consecuencias más dramáticas de la infección vírica, existen otras posibilidades de relación entre el virus y la célula huésped. Al igual que otros parásitos, muchos virus han encontrado ventajoso persistir inocuamente en el interior de la célula huésped durante un período indefinido, multiplicándose activamente sólo cuando el huésped disminuye o detiene su crecimiento. La existencia de estos virus latentes fue intuida ya en la década de 1920; pero habría que esperar hasta principios de la década de 1950, para que André Lwoff y sus colaboradores del Instituto Pasteur establecieran de modo inequívoco que un virus latente, o "provirus", puede transmitirse desde una generación celular hasta la siguiente sin reinfección exterior. Trabajando con bacteriófagos, es decir, con virus que infectan bacterias, demostraron que el provirus o profago existe en un estado "lisogénico". El término lisogénico indica la posibilidad que tiene un profago para salir de la etapa latente y dar lugar a partículas víricas capaces de lisar, o disolver, células bacterianas. Entre los agentes que pueden inducir a un provirus hasta su multiplicación autónoma, se encuentran las radiaciones ultravioleta, los rayos X y los compuestos químicos cancerígenos. En el transcurso de los últimos 20 años, el estudio de los bacteriófagos ha enriquecido considerablemente el conocimiento de la lisogenia.

Un bacteriófago convencional consta de una molécula linear de ácido nucleico protegida por una cubierta proteica. Recordando a una pequeña jeringa hipodérmica, el fago se fija a una célula bacteriana e inyecta su ADN en el interior de la misma. Una vez dentro, el ADN vírico puede comenzar inmediatamente la construcción de nuevas partículas víricas o convertirse en profago al incorporarse en el ADN del cromosoma, largo y entrelazado, de la célula bacteriana.

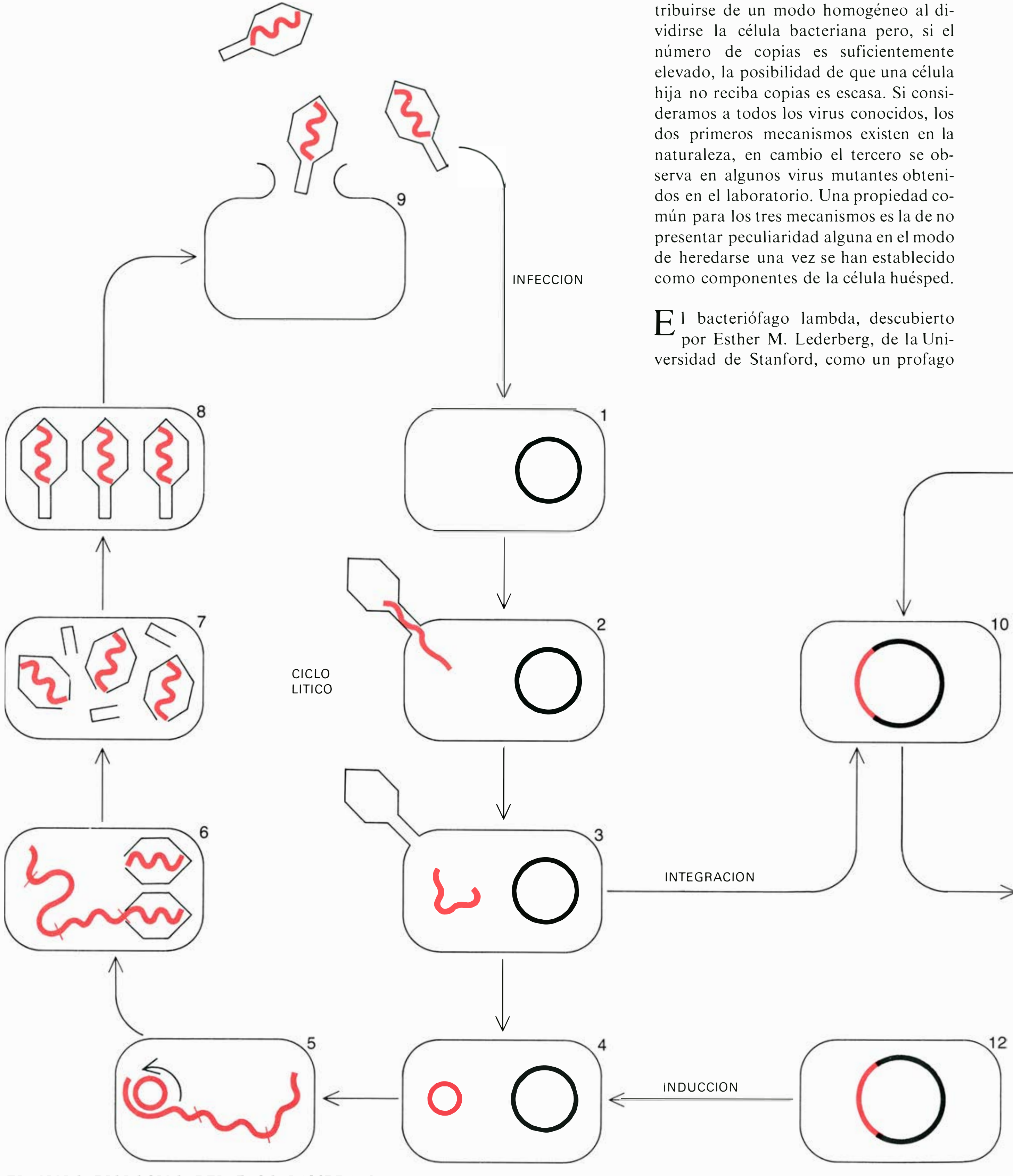
¿Qué es lo que induce al provirus a pasar de un estado lisogénico a una producción activa de partículas víricas? En 1961, François Jacob y Jacques Monod, del Instituto Pasteur, propusieron un mecanismo que más tarde fue demostrado por Mark Ptashne, de la Universidad de Harvard. Sólo se expresa un pequeño número de genes en la forma de profago; el producto de uno de ellos es una proteína denominada "represor" que, combinada con el ADN vírico, evita la expresión de los restantes genes del virus, en particular, los responsables de la replicación independiente del cromosoma vírico. Agentes inductores, como los rayos X, alteran el metabolismo bacteriano produciéndose una sustancia que inactiva al represor. Si todas las moléculas del represor de una bacteria lisogénica determinada se inactivan simultáneamente, los genes víricos se expresan de un modo secuencial. En primer lugar, se sintetizan las proteínas necesarias para la replicación del ADN vírico, seguidas de las proteínas de la cabeza y de la cola del virus, que de un modo espontáneo se ensamblan en el interior de la bacteria. Las unidades del ADN vírico quedan incluidas y empaquetadas en las cabezas de los bacteriófagos. Finalmente, al cabo de unos 60 minutos del tratamiento de la célula con el agente inductor, ésta se lisa, liberando alrededor de 100 partículas víricas capaces de infectar a otras células.

Cuando una célula bacteriana lisogénica se multiplica para formar una colonia, cada célula componente de la misma tiene una capacidad potencial para producir virus; de hecho, expresa esta capacidad cuando el represor se destruye. Por consiguiente, la descendencia celular, al tener integrados los genes víricos entre los genes bacterianos, heredará esta doble información genética. En este sentido, el cromosoma vírico replicará como cualquier componente celular normal y habrá de repartirse durante la división celular de tal modo que cada célula hija reciba como mínimo una copia vírica.

Este resultado puede obtenerse, como mínimo, de tres modos distintos. Uno de ellos consiste en la integración del cromosoma vírico en el cromosoma de la célula huésped de tal modo que se replique y distribuya durante la división celular como parte del ADN de la célula huésped. Otro camino estriba en el establecimiento independiente del cromosoma vírico; éste se replica y distribuye como el cromosoma del huésped, pero de una manera autónoma. Una tercera posibilidad para el cromosoma vírico consiste en la replicación separada de la replicación del cromosoma del huésped, pero con varias copias. En este tercer

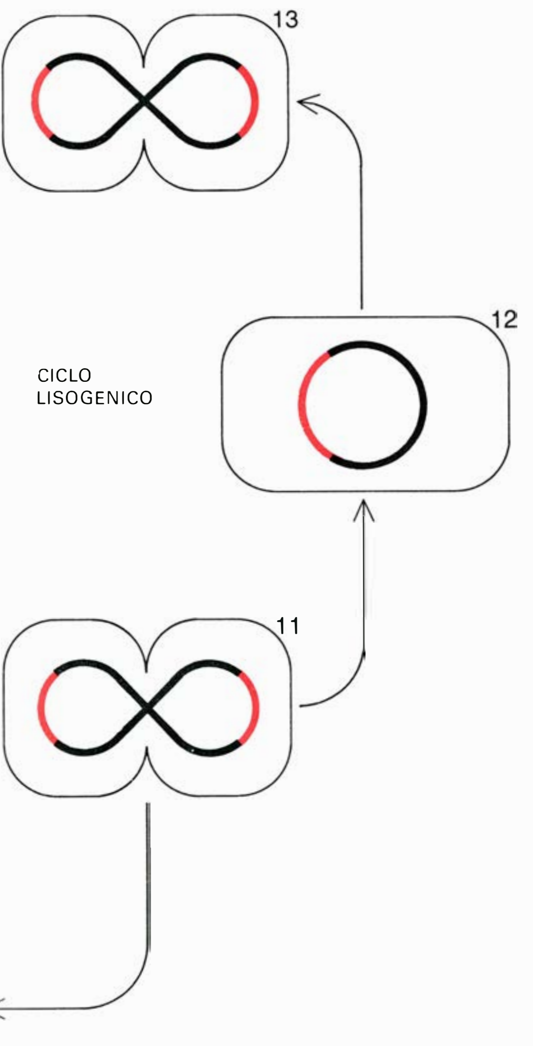
caso, el cromosoma vírico no debe distribuirse de un modo homogéneo al dividirse la célula bacteriana pero, si el número de copias es suficientemente elevado, la posibilidad de que una célula hija no reciba copias es escasa. Si consideramos a todos los virus conocidos, los dos primeros mecanismos existen en la naturaleza, en cambio el tercero se observa en algunos virus mutantes obtenidos en el laboratorio. Una propiedad común para los tres mecanismos es la de no presentar peculiaridad alguna en el modo de heredarse una vez se han establecido como componentes de la célula huésped.

El bacteriófago lambda, descubierto por Esther M. Lederberg, de la Universidad de Stanford, como un profago



EL CICLO BIOLOGICO DEL FAGO LAMBDA demuestra que puede evitarse la lisis y muerte de una bacteria infectada. Tras la inyección de una molécula de ADN vírico en una célula de *E. coli* (*2*), se presentan dos posibilidades. En la fase lítica, o productiva, el ADN vírico adopta una forma circular (*3* y *4*); se replica por un proceso de "replicación rotativa", originando una larga cadena de ADN que contiene varias copias de los genes víricos (*5*); éstos ordenan la síntesis y ensamblaje de las proteínas de la cabeza y cola del virus, así como la correspondiente distribución en las cabezas de segmentos unitarios de ADN (*6* y *7*). Cabezas y colas se unen espontáneamente en el interior de la bacteria, originando partículas viables de fago (*8*). Finalmente, a los 60 minutos de la infección, se lisa la célula huésped liberando unas 100 partículas víricas capaces de infectar a otras tantas células de *E. coli* (*1* y *9*). Alternativamente, dependiendo de las condiciones de infección, el ADN del fago lambda puede coexistir con la célula huésped, instalándose como una parte semipermanente del cromosoma bacteriano (*10*). Allí se replica y segrega durante cada división celular (*11* y *12*) transmitiéndose por tiempo indefinido a sucesivas generaciones. El

de la cepa K 12 de la enterobacteria *E. coli,* es bajo el punto de vista genético el mejor descrito y comprendido y aun hoy sigue siendo uno de los virus preferidos por los especialistas en biología molecular. Inmediatamente después de la demostración por Lwoff de la lisogenia heredable, algunos investigadores pudieron llevar a cabo cruzamientos genéticos entre cepas de *E. coli* lisogénicas y no lisogénicas para el fago lambda. Los sorprendentes resultados obtenidos demostraban que el carácter lisogénico o no lisogénico estaba distribuido entre la descendencia resultante de los cruzamientos, exactamente igual como si estuviera determinado por un gen de localización específica perteneciente al cromosoma bacteriano. De hecho, el



virus latente o profago retiene, sin embargo, la potencialidad de multiplicarse libremente a través de un ciclo lítico. Las bacterias que contienen un profago se denominan lisogénicas, que alude a su capacidad de originar la multiplicación fágica que conduce a la lisis. Esta puede inducirse por la exposición de las bacterias a radiaciones ultravioleta, rayos X y compuestos químicos.

fago lambda se comportaba en los cruzamientos como si estuviese estrechamente unido al operón *gal,* que es un grupo de genes bacterianos comprometidos en el metabolismo de la galactosa.

Actualmente se admite que el profago lambda se encuentra integrado en un lugar específico del ADN de *E. coli,* concretamente entre el operón *gal* y el operón *bio,* responsable este último de la síntesis de la biotina. El significado biológico de este proceso de integración no es privativo de la virología. Señala el camino, la vía, por la que dos unidades genéticas, cada una capaz de replicarse independientemente, pueden combinarse en una unidad mayor. El fago lambda es sólo uno entre muchos elementos genéticos con capacidad de integración conocida o sospechosa. La mayoría de estos elementos genéticos son virus o pequeños fragmentos de ADN denominados plásmidos, algunos de los cuales puede transferir de una célula bacteriana a otra la resistencia a determinados antibióticos u otras propiedades. Además, se han descrito las "secuencias de inserción" de las bacterias y los "elementos de control del maíz", conocidos sólo por su capacidad para moverse ocasionalmente desde una localización cromosómica a otra y sin posibilidad de independencia.

Aunque la presencia masiva de elementos genéticos que hayan podido integrarse en cromosomas preexistentes es imprevisible, existe una considerable divergencia de opinión respecto a su importancia en el desarrollo y evolución del huésped. Para unos, estos elementos resultan básicamente extraños a las células que los contienen; son invasores, como los virus que han alcanzado de alguna manera células y cromosomas sin incorporarse realmente en ellos. Alternativamente, hay quienes entienden que mucho ADN, actualmente presente en los cromosomas, procede de elementos originalmente extraños que, a través de pequeñas etapas evolutivas, se convirtieron de un modo gradual en ciudadanos de la comunidad intracelular. Una posición intermedia atribuye a la movilidad de estos elementos genéticos un papel esencial en el desarrollo eutrófico de los organismos pluricelulares, desde la fertilización de la célula huevo hasta su estado adulto.

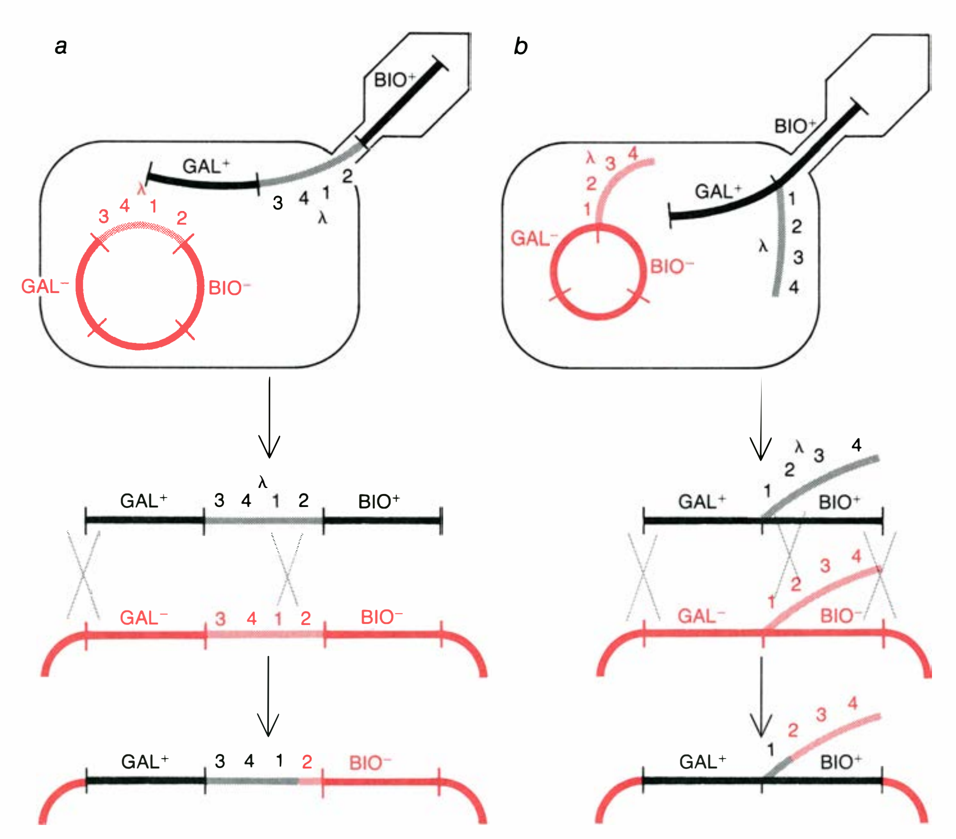
Los estudios del mecanismo por el que nuevos elementos genéticos se incorporan a los cromosomas existentes no proporcionan información suficiente y directa acerca de su origen y función. Sin embargo, estos trabajos son relevantes en un aspecto. Si éste aclarase que el ADN de los elementos genéticos incorporados estaba ligado al cromosoma por algún procedimiento distinto, mediante conexiones que no eran características de la estructura cromosómica, entonces podría establecerse una diferencia clara entre el ADN nativo y el ADN extraño. Por lo tanto, si ello se confirmase, sería particularmente importante para establecer firmemente si el ADN extraño de algunos modelos, como el del profago lambda, están integrados directamente en la secuencia linear de los genes del cromosoma de la célula huésped.

El concepto de genes ordenados en una secuencia linear y las bases experimentales del mismo tienen una larga historia. En 1913, A. H. Sturtevant, de la Universidad de Columbia, cruzó moscas de la fruta, distintas entre sí para algunos caracteres genéticos, y analizó las frecuencias de las nuevas combinaciones que manifestaba la descendencia respecto a los caracteres de sus antecesores. El autor comprobó que los determinantes para estos caracteres (casualmente reunidos en el mismo cromosoma) estaban distribuidos por sí mismos en una misma estructura unidimensional, surgiendo nuevas combinaciones de la redistribución de los fragmentos de esta estructura. En la década de 1950 se pudo ampliar esta clase de análisis formal de ligamiento, cuando Seymour Benzer, de la Universidad de Purdue, trabajando con pequeños fragmentos de cromosoma fágico, demostró que los mapas de ligamiento de las mutaciones intragénicas corresponden asimismo a una estructura unidimensional. Estos estudios puramente genéticos fueron constatados por trabajos citológicos y bioquímicos que demostraban la relación entre la unidimensionalidad de los mapas de ligamiento y la distribución linear de los genes a lo largo del cromosoma, por una parte, y, después, con la secuencia linear de nucleótidos a lo largo de la doble hélice del ADN. En definitiva, la correspondencia entre el mapa genético, el mapa cromosómico y la estructura del ADN.

El problema que hace referencia al ensamblaje de los segmentos lineares de ADN en el cromosoma para formar una doble hélice continua, no está completamente resuelto, sin embargo la prueba en este sentido parece sólida. Hacia mediados de la década de 1960, la incertidumbre respecto a este problema era tal que muchos especialistas en genética microbiana no encontraban sorprendente la idea de que un profago estuviera junto al cromosoma en lugar de estar integrado en el mismo.

ELEMENTO INTEGRADO	LONGITUD APROX. EN NUCLEOTIDOS	INTEGRADO EN	PROPIEDADES ESPECIALES
BACTERIOFAGO LAMBDA	50,000	CROMOSOMA DE *E. COLI*	LOCI ESPECIFICOS EN LOS CROMOSOMAS DEL VIRUS Y HUESPED
BACTERIOFAGO MU-1	37,000	CROMOSOMA DE *E. COLI*	LOCI ESPECIFICOS EN LOS CROMOSOMAS DEL VIRUS Y HUESPED
FACTOR SEXUAL DE LAS BACTERIAS *F*	100,000	CROMOSOMA DE *E. COLI*	VARIOS LOCI EN EL CROMOSOMA HUESPED
RESISTENCIA A LOS ANTIBIOTICOS PLASMIDOS	20,000	FACTOR BACTERIANO SEMEJANTE AL F	TRANSMITE LA RESISTENCIA A LOS ANTIBIOTICOS ENTRE CEPAS BACTERIANAS
VIRUS ONCOGENICO SV-40	5,000	CROMOSOMA HUMANO	DERIVADO DE CELULAS DE MONO
ELEMENTOS DE TRANSPOSICION	DESCONOCIDA	CROMOSOMAS DEL MAIZ	NO SE CONOCE FASE EXTRACROMOSOMICA
SECUENCIAS DE INSERCION IS2	1,400	CROMOSOMA DE *E. COLI*	

LOS ELEMENTOS GENETICOS EXTRACROMOSOMICOS son pequeños fragmentos de ADN que pueden existir de un modo independiente o formando parte del cromosoma. Se han observado en bacterias, células humanas y células de maiz. Algunos son virus, otros no. Cuando están integrados, introducen en la célula instrucciones que controlan reacciones bioquímicas adicionales. Estas reacciones bioquímicas pueden superponerse al metabolismo celular.



TIPOS DE INTERCAMBIO GENETICO, o de recombinación, observados entre dos cromosomas lisogénicos de *E. coli* con marcadores genéticos distintos. Este proceso puede aclarar el modo de integración de los genes del fago lambda. En el experimento ilustrado, un fago lambda, con mutaciones en los genes *1, 2, 3* y *4*, que transporta un fragmento de ADN bacteriano capaz de metabolizar galactosa y sintetizar biotina *(gal⁺bio⁺)*, se introduce en una bacteria lisogénica con profago normal pero incapacitada por mutación para la síntesis de galactosa y biotina *(gal⁻bio⁻)*. En *a* se esquematiza el tipo de recombinación que puede presentarse, si los genes están colocados linearmente en cada cromosoma. El mecanismo de integración propuesto por el autor requiere la permutación del orden de los genes a lo largo del cromosoma vírico, de modo que un intercambio entre los genes *1* y *2* sirve para recombinar los marcadores bacterianos adyacentes *gal* y *bio*. La bacteria recombinante que resulta sería capaz de utilizar galactosa pero no sintetizaría biotina, predicción ésta que concuerda con los resultados observados. Por comparación, en *b* se esquematiza el modelo de una clase de topología no linear, en la que se observa cómo el profago se une como una rama al cromosoma.

Un camino para investigar el problema consiste en cruzar dos líneas de bacterias lisogénicas en las que los genes de ambos huéspedes y del virus se hallan marcadas con mutaciones. En estos cruzamientos bacterianos, fragmentos de ADN procedentes de las células donadoras se introducen en las células receptoras. Allí se aparean con los segmentos correspondientes del ADN de las células receptoras reemplazándoles en alguna fracción. La descendencia en la que se ha sustituido un gene específico, puede reconocerse y seleccionarse porque manifiesta un carácter genético propio de la célula donadora, por ejemplo, la capacidad para metabolizar la galactosa. En los últimos años se ha conseguido el reconocimiento de la sustitución de genes específicos en el profago al aislarse los virus mutantes condicionalmente letales, es decir, que no pueden multiplicarse bajo determinadas condiciones controladas. Por ejemplo, los mutantes sensibles a la temperatura sobreviven y se multiplican a 25° C, pero no lo pueden hacer a 42° C.

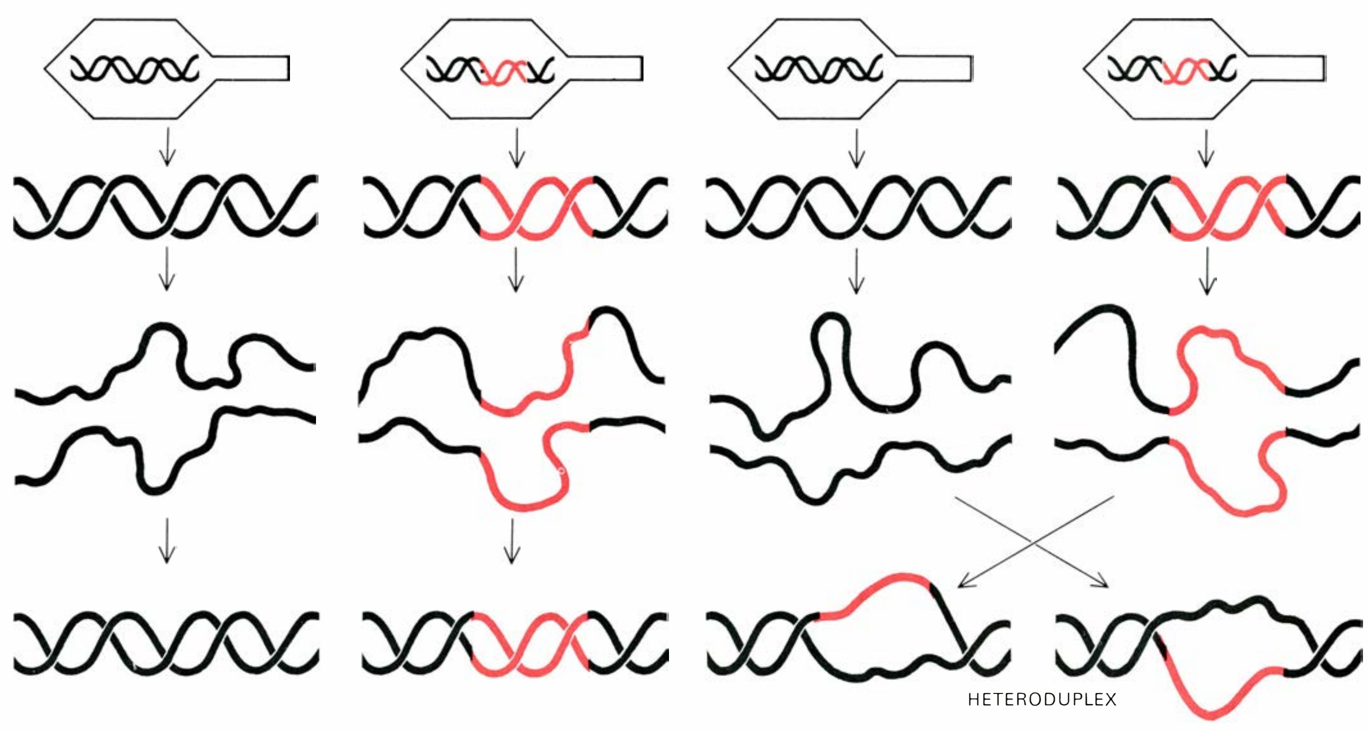
Estas investigaciones han arrojado cierta luz sobre el modo de fijación de los profagos. Si, por ejemplo, el profago no está linealmente integrado en el cromosoma huésped, pero en cambio actúa a su lado, podría esperarse que un cambio genético que ocurriera en el segmento vírico no afectara a los genes sitos en el eje del cromosoma huésped. Lo cierto es que se produce una redistribucion de los genes del huésped, lo cual sugiere una inserción realmente linear.

Un segundo método, más informativo, para determinar la topología del cromosoma lisogénico es el mapado por delección. Cifras mutantes marcadas por delecciones cromosómicas se cruzan con cepas que tienen otros marcadores genéticos. Una mutación por delección implica la pérdida permanente de un fragmento del cromosoma cuya longitud puede estar comprendida entre uno a varios miles de nucleótidos. Como cada delección elimina un segmento continuo del cromosoma, puede deducirse el orden de los genes a lo largo del mismo con la información obtenida a partir de las distintas características fenotípicas de varios mutantes. La obtención de mapas de delección proporciona un criterio estricto para la localización de la posición de los genes. La condición de que cada delección observada debería ser representable como un segmento linear es altamente restrictiva; un segmento representado por la delección de dos marcadores debe incluir necesariamente todos los puntos situados entre ellos. Por ejem-

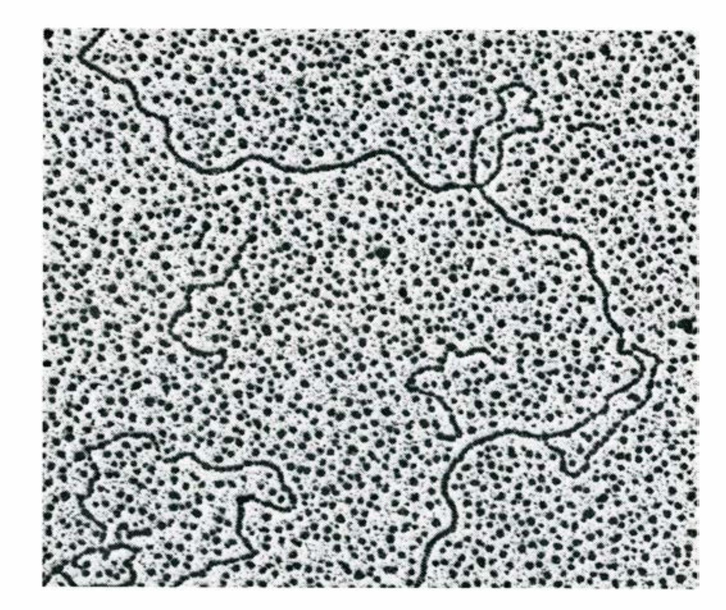
plo, si el profago está integrado entre dos genes conocidos del huésped, cada delección que elimine a los dos afectará del mismo modo al profago.

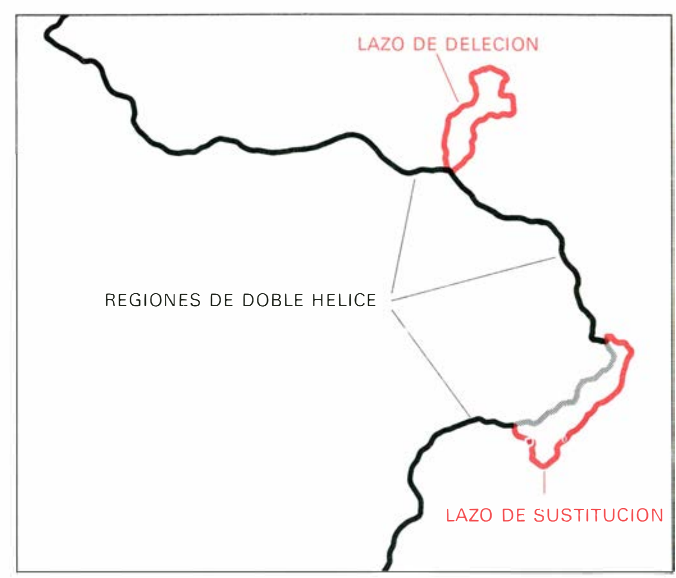
La confirmación experimental de estos hechos ratifica el modelo de la inserción lineal del profago en el ADN del huésped.

Hasta el comienzo de la década de 1970, el análisis genético descrito era el único que proporcionaba una información precisa sobre la relación entre profago y cromosoma; no existía información física directa de las secuencias de nucleótidos a lo largo de las cadenas del ADN del profago. En principio, una aproximación elemental podría consistir en el empleo de métodos directos que determinasen la secuencia de nucleótidos a lo largo de las cadenas de ADN vírico y cromosoma lisogénico. No obstante, aunque la metodología progresara con rapidez, la identificación de los 50.000 nucleótidos del profago lambda represen-



MOLECULAS HIBRIDAS DE ADN obtenidas artificialmente y empleadas en la elaboración de mapas genéticos. La doble cadena del ADN se separa por calentamiento, originándose dos cadenas sencillas. Si se mezclan cadenas sencillas con segmentos complementarios y no complementarios en un medio sometido a un enfriamiento gradual, aparecerán estructuras en doble cadena. Observadas al microscopio electrónico, las dos cadenas de ADN formarán una doble hélice verdadera en los lugares con secuencias de nucleótidos coincidentes, en cambio estarán desunidas en las zonas de no coincidencia. Con este método se puede precisar la posición del mapa físico de un marcador a lo largo de la molécula de ADN.

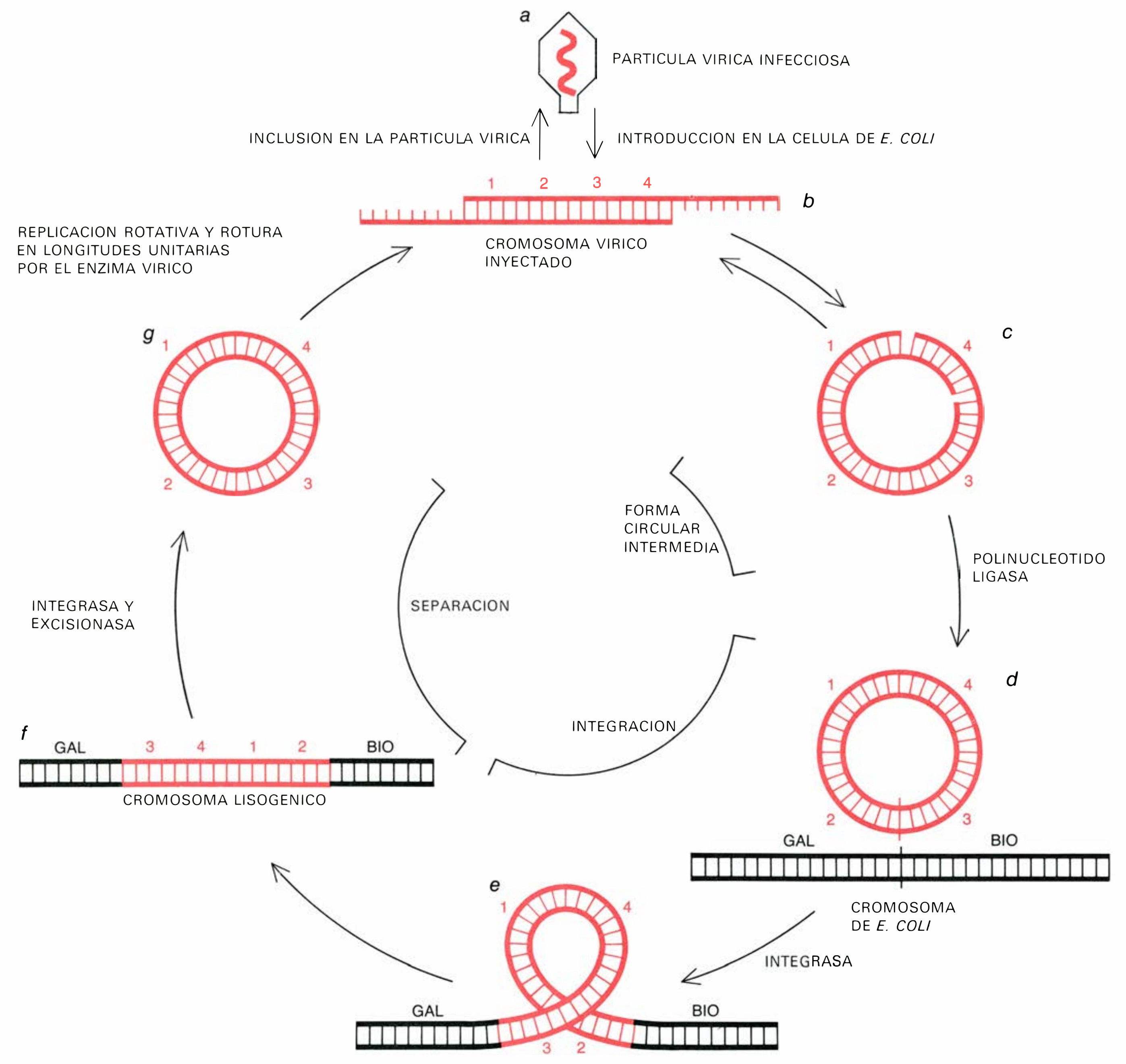




HETERODUPLEX entre una cadena de ADN del fago lambda normal y otra que contiene dos mutaciones (la micrografía electrónica solo corresponde a un pequeño fragmento del ADN vírico total). El lazo del ADN de cadena sencilla, que se observa en el ángulo superior derecho, tiene su origen en una mutación por delección que aísla un segmento completo de ADN de una de las cadenas. El asa del ángulo inferior derecho resulta de una sustitución de varios nucleótidos de una cadena. Los restantes segmentos de la molécula que se observan son de doble cadena.

taba un trabajo enorme y un consumo de tiempo imprevisible. Sin embargo, podría obtenerse una información adecuada en muchos aspectos conociendo que el ADN de una sola cadena es capaz de unirse "in vitro" con secuencias complementarias de nucleótidos y constituir un ADN de doble cadena. Micrografías de ADN formadas con este procedimiento, obtenidas en el laboratorio de Norman R. Davidson, del Instituto de Tecnología de California, y por Waclaw T. Szybalski, de la Universidad de Wisconsin, han demostrado que las estructuras conseguidas con esta metodología poseen, en efecto, una realidad física.

Por otra parte, se han realizado experiencias, mediante las cuales, moléculas de ADN de doble cadena obtenidas de partículas víricas se disocian en presencia de una fuente de calor hasta mo-



LA INSERCION Y SEPARACION de los genes del fago lambda en el cromosoma de *E. coli* necesitan la actuación de enzimas bacterianos y víricos. El ADN del fago lambda incluido en la partícula vírica *(a)* es una doble hélice linear, excepto en los segmentos complementarios de 12 nucleótidos no apareados correspondientes al comienzo y al final de las dos cadenas de nucleótidos (*b*). En solución, la forma linear se equilibra con la forma circular que se ha ensamblado a través de los dos extremos complementarios de 12 nucleótidos (*c*). Cuando en el proceso de infección, el ADN vírico se inyecta en la célula bacteriana, los dos cierres abiertos de la molécula circular se unen por el enzima polinucleótidoligasa bacteriano, de tal modo que ambas cadenas circulares se encuentran cerradas en toda su extensión *(c)*. Esta molécula circular interacciona con un segmento concreto del cromosoma de *E. coli* (entre los genes *gal* y *bio*). En lugares específicos, los cromosomas vírico y bacteriano se rompen y unen, de tal modo que el ADN vírico queda insertado en el ADN huésped; esta reacción está catalizada por una integrasa vírica (*e*). (Obsérvese que el orden de los genes en el profago, *3, 4, 1, 2,* ha experimentado una permutación cíclica respecto al orden establecido en el virus, que era *1, 2, 3, 4*.) En estas circunstancias, el cromosoma de *E. coli* es ahora lisogénico para el fago lambda *(f)*. Las radiaciones o compuestos químicos adecuados pueden inducir al virus hacia la fase lítica. Cuando esto sucede, el represor lambda que bloquea la expresión de los genes víricos se inactiva, empezando la síntesis del enzima vírico llamado excisionasa. Conjuntamente con la integrasa, la excisionasa cataliza la separación del profago del cromosoma de la célula huésped adoptando la forma circular primitiva y con la disposición original de los genes (*g*). El ADN vírico circular se replica dando lugar a numerosas copias que se rompen en cadenas lineares con los extremos no apareados de 12 nucleótidos apropiados para cerrarse en el momento adecuado (*b*). Cada segmento de ADN linear se incluye en la cubierta vírica (*a*). Cuando se rompe la célula huésped, los fagos liberados infectan multitud de células sanas, y, en consecuencia, comienza nuevamente el llamado ciclo lisogénico.

léculas de cadena sencilla. Si la solución que las contiene se enfría lentamente, volverán a reconstituirse cadenas de doble hélice. Cuando cadenas sencillas de ADN procedentes de dos virus con algunas secuencias comunes en sus nucleótidos (como el fago lambda y un mutante del mismo obtenido por delección) se mezclan antes del enfriamiento, pueden formarse nuevas hélices no sólo entre cadenas complementarias del mismo virus, sino también entre cadenas complementarias de dos virus distintos. Esta última clase de cadena se conoce con el nombre de heteroduplex. Los nucleótidos en los segmentos complementarios de estas cadenas híbridas se aparean y forman dobles hélices, pero no lo hacen las secuencias no complementarias, dejando fragmentos no apareados que se han detectado en micrografías electrónicas.

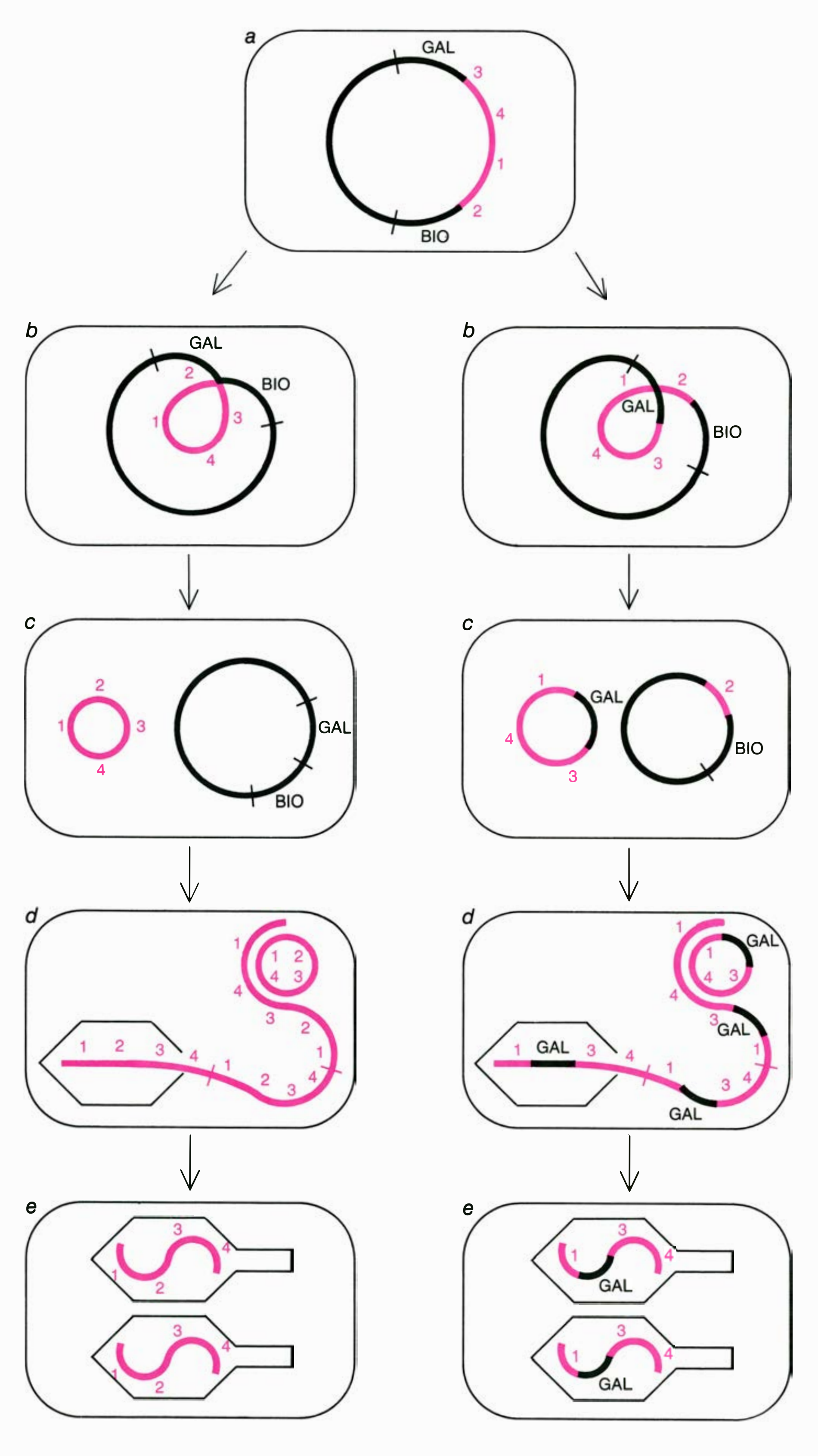
Mediante ingeniosas manipulaciones, Davidson y sus colaboradores Phillip A. Sharp y Ming-Ta Hsu consiguieron observar heteroduplex entre el ADN de un virus y el ADN de un profago integrado. Aunque el hallazgo más deseable sería conseguir heteroduplex entre una cadena de ADN del fago lambda y la cadena complementaria de un cromosoma de una bacteria lisogénica, esta experiencia no se ha conseguido todavía por las enormes dificultades que representa el manejo de una molécula de ADN del tamaño del cromosoma bacteriano. El mismo resultado podría obtenerse por la unión del ADN del fago lambda con una pequeña molécula de ADN, derivada del factor sexual de las bacterias que contiene además el segmento específico de ADN cromosómico en el que se inserta el fago lambda. Cadenas aisladas e intactas del factor sexual y el profago lambda podrían utilizarse para formar heteroduplex con ADN procedente de partículas víricas.

Los conocimientos actuales de la estructura del cromosoma lisogénico proceden de una combinación de los estudios genéticos y físicos. Las etapas a través de las cuales esta estructura se forma y disocia en sus partes componentes constituyen el objetivo de la investigación actual. Durante el ciclo biológico del fago lambda, su ADN se une primero por sus extremos y, después, se abre para integrarse en el cromosoma formando el profago. El ADN del fago lambda, cuando se introduce en la célula bacteriana, es lineal; pero antes de integrarse en el cromosoma bacteriano se une por sus extremos para formar una molécula circular. Durante la inserción, la molécula se abre por un punto distinto al que se ha cerrado. Consecuentemente, aunque los cromosomas del fago y del profago son estructuras lineales, el orden de los genes no es el mismo en cada caso.

El mecanismo por el que se unen los extremos del ADN fágico se conoce gracias a los trabajos de A. D. Kaiser y sus colaboradores, de la Universidad de Stanford. El ADN del fago lambda forma una doble hélice a lo largo de la mayor parte de la molécula, pero uno de los extremos de cada cadena sobresale de la estructura en doble cadena, con una longitud equivalente a 12 nucleótidos. Estos dos fragmentos monocatenarios son complementarios, y se denominan "extremos adherentes". En solución, existe un equilibrio entre el ADN cíclico y el ADN lineal. Cuando el fago lambda infecta a una célula de *E. coli,* la molécula lineal del ADN vírico se cierra mediante una polinucleotidoligasa, enzima bacteriano que repara roturas en una de las cadenas de la doble hélice. Esta etapa no requiere enzimas víricos y no es específica de las secuencias de nucleóticos implicadas. Por otra parte, la inserción del ADN vírico en el cromosoma bacteriano requiere el reconocimiento y separación de secuencias altamente específicas de polinucleótidos de los cromosomas fágico y bacteriano, respectivamente.

Poco se conoce acerca de la bioquímica del proceso de integración, aunque su control genético ha sido estudiado intensamente. En 1962, época en la que el autor propuso el modelo de la molécula circular para la inserción del fago lambda, el único mecanismo conocido para la separación y unión de dos moléculas de ADN en los puntos correspondientes era la recombinación homóloga, que requiere en las moléculas secuencias similares o idénticas en la región de recombinación. Las etapas químicas mediante las cuales tiene lugar la recombinación homóloga se encuentra todavía en fase especulativa, pero Alvin J. Clark, de la Universidad de Berkeley, California, y otros especialistas han conseguido aislar mutantes bacterianos que son incapaces de llevar a cabo este proceso. En condiciones bajo las cuales la recombinación homóloga se halla bloqueada por estas mutaciones, el fago lambda puede integrar todavía su ADN con frecuencia normal. En estas circunstancias, la integración del ADN vírico parece cumplirse mediante enzimas víricos, que cortan y unen moléculas de ADN en *loci* altamente específicos. Esto descarta la colaboración de enzimas bacterianos de recombinación homóloga.

La prueba directa de la existencia de



LAS NUEVAS VARIANTES VIRICAS se producen cuando ciertos provirus pasan a ser virus infecciosos, que matan a la bacteria que los hospedan, llevándose consigo fragmentos de ADN del huésped destruido. Los genes bacterianos "transductados", unidos al cromosoma vírico, pueden luego replicarse. Se supone que la transducción obedece a errores en la separación del profago situado en el cromosoma de la célula huésped. La separación normal (*serie de la izquierda*) se da en la gran mayoría de las células. El ADN vírico se separa del ADN bacteriano (*b*) para formar un cromosoma vírico circular y un cromosoma bacteriano no lisogénico (*c*). El virus se replica, al fin, en círculo rodante que origina una cuerda de ADN, en que la secuencia vírica se repite varias veces (*d*). Las moléculas unidas de ADN se agrupan en partículas infecciosas (*e*). Una separación por cada 100.000 (*serie de la derecha*) es anormal; se genera entonces una recombinación que origina una molécula circular de ADN que contiene genes víricos y bacterianos.

estos enzimas víricos ha sido demostrada a través de los estudios genéticos de James F. Zissler, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, y de los trabajos bioquímicos de Howard A. Nash, del Instituto Nacional de Salud Mental, que demostraron la necesidad del producto enzimático elaborado por un gen vírico específico (al que se le puede dar la categoría de integrasa) para la integración del ADN vírico; los virus mutantes carentes de este enzima son incapaces de lisogenizar. Estudios similares del proceso inverso, es decir, la separación del ADN vírico del cromosoma bacteriano, realizados por Gabriel Guarneros y Susan Gottesman, del National Cancer Institute, han mostrado que la separación requiere, amén de la integrasa, el producto de un segundo gene vírico (llamado excisionasa). El virus introduce en la célula huésped la maquinaria enzimática para cortar y unir el ADN vírico y de la célula huésped en *loci* específicos para llevar a cabo la inserción y separación del profago. Cuando la transcripción del gen que codifica la excisionasa se bloquea por el represor lambda, el profago permanecerá integrado. Al cesar la represión, el gene de la excisionasa se expresará, produciendo un cambio recíproco en el cromosoma lisogénico, restaurándose por una parte la molécula circular del ADN del fago lambda y, por otra, el cromosoma bacteriano no lisogénico.

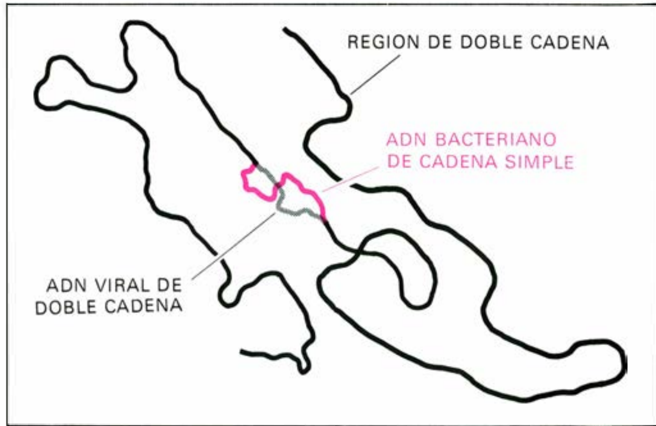
La separación suele verificarse con elevada precisión: más del 99 por ciento de las partículas víricas producidas por las células lisogénicas son idénticas al virus infectante original. Ello implica que el ADN del fago, al separarse del cromosoma bacteriano, lo hace por el mismo punto en que se integró. No obstante, una separación por cada 100.000 es anormal. En estos casos, la separación no se traduce en una escisión neta entre las dos moléculas de ADN; en cambio, se establece una recombinación que origina una molécula circular de ADN que contiene genes víricos y bacterianos. Si el tamaño y características de este ADN permite el reconocimiento por las proteínas víricas como una molécula apta para la replicación y posterior construcción del virus, pueden originarse partículas infecciosas en las que una parte del ADN vírico ha sido reemplazado por ADN de la célula huésped.

M. Laurance Morse, del Centro Médico de la Universidad de Colorado, descubrió la existencia de estas variantes víricas "transductantes" al observar

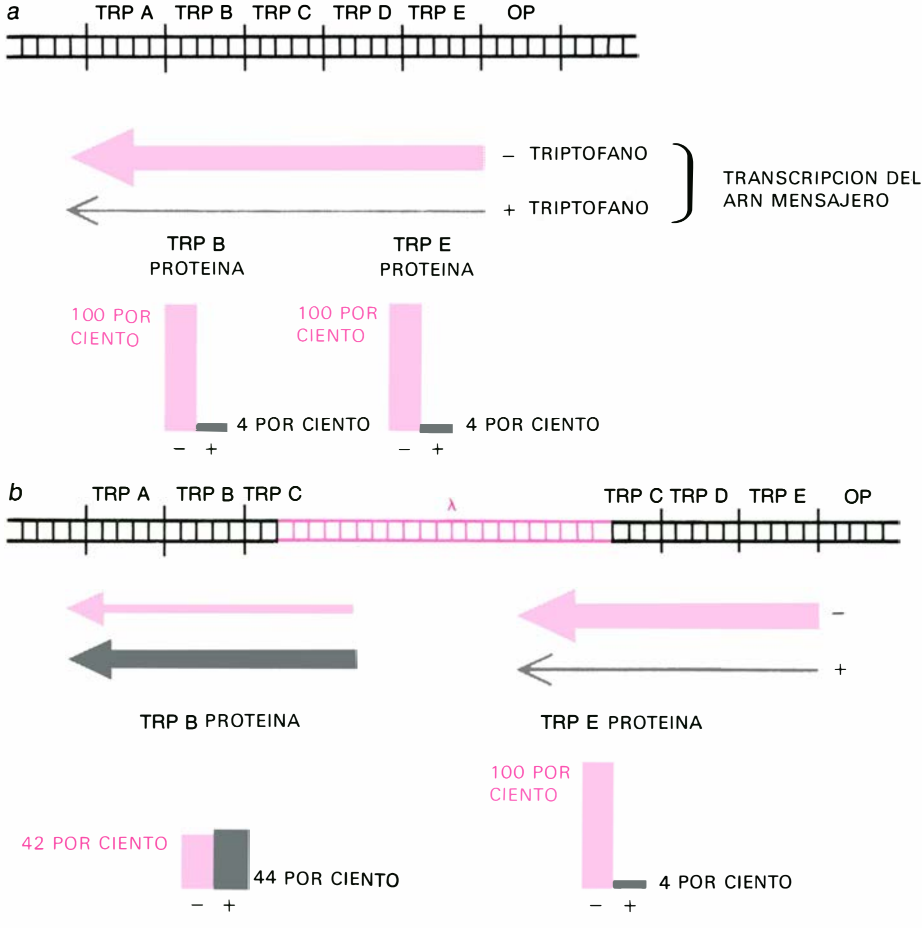
que algunas de las partículas del fago lambda, liberadas de bacterias lisogénicas, contenían los genes del operón *gal* de la célula huésped. Cuando los ADN del fago lambda y del fago lambda-*gal* se hibridan "in vitro", los heteroduplex manifiestan que los nucleótidos de los dos extremos de las moléculas son complementarios, pero en la zona media del duplex existe una región no apareada, en donde el segmento de ADN bacteriano adquirido (en el que localiza el operón *gal*) no se complementa con el ADN vírico.

La teoría que explica la producción de fagos transductantes, por errores en la separación del profago situado en el cromosoma de la célula huésped, se basa en la observación de que, bajo circunstancias normales, el bacteriófago lambda sólo incorpora algunos genes, como el *gal,* situados a escasos millares de nucleótidos de su lugar de integración. Esta distancia es una pequeña fracción (inferior a un 1 por ciento) de la longitud total del cromosoma de la célula huésped. Recientemente, K. Shimada y colaboradores, del National Institute of Health, han estudiado cepas bacterianas poco comunes en las que el ADN del fago lambda está integrado en un lugar del cromosoma huésped distinto del usual. Estas cepas víricas anormales no eran portadoras del gen *gal,* pero llevaban genes cercanos al lugar del nuevo punto de integración.

Por qué los virus han desarrollado un mecanismo tan específico y complejo para que su ADN entre y salga del cromosoma huésped? La contestación es la que relaciona la capacidad para realizar este proceso respecto al tiempo. El tiempo representa un papel importante en la supervivencia de los virus. Poco se conoce acerca de la presión selectiva que actúa sobre los virus en la naturaleza, pero uno puede imaginar la ventaja que representa para un virus integrar su ADN inmediatamente después de la infección, permaneciendo en este estado mientras



EL HETERODUPLEX, obtenido "in vitro", entre el ADN procedente de un fago transductante llamado Φ 80 psu_3 y el ADN del fago 80 original, manifiesta la localización de genes bacterianos integrados en el cromosoma vírico. Las líneas negras del mapa representan las regiones de la doble hélice, es decir, donde son complementarias las secuencias de nucleótidos de las cadenas de ADN de ambos fagos. El fragmento coloreado es una pieza de 3000 nucleótidos perteneciente al ADN de *E. coli,* transportado por el fago transductante. El segmento gris corresponde a un ADN vírico de 2000 nucleóticos, que se encuentra en el fago normal Φ 80, pero que está sustituido por ADN bacteriano en el fago Φ 80 psu_3. Las secuencias de ADN víricas y bacterianas situadas en cadenas opuestas no pueden complementarse ni aparearse, formando un lazo por sustitución. La longitud total de la doble molécula se aproxima a los 43.000 nucleótidos. La micrografía electrónica se debe a Madeline C. Wu y Norman R. Davidson pertenecientes al Instituto de Tecnología de California.



LA INTEGRACION ANORMAL del cromosoma del fago lambda en el operón *trp* (grupo de genes bacterianos que codifican cinco enzimas para la vía biosintética del triptófano) desorganiza el control genético del operón. En el operón normal (*a*) la transcripción de los genes *trp* hasta el ARN mensajero se regula por la concentración de triptófano. Cuando los niveles celulares del triptófano son altos, la transcripción se reprime; en cambio, a niveles bajos de triptófano, la transcripción y síntesis de los enzimas *trp* es muy alta. Si el fago lambda integra su ADN en el gene *trpC* (*b*), el operón, como modelo unitario de transcripción, queda desorganizado. Los genes situados antes del ADN vírico, (*trpD* y *trpE*) continuarán transcribiendo normalmente, en cambio no sucede lo mismo con los genes situados más allá del ADN vírico, (*trpA* y *trpB*), pues la transcripción no cursa a través del ADN del profago. Sin embargo, estos genes se expresan de alguna manera, porque la transcripción procedente del profago no se puede reprimir por el triptófano. (Los niveles de proteína representados corresponden a una mutante del fago lambda, la cual presenta una tasa de transcripción muy alta.)

se desarrolla la bacteria lisogénica, o separándose del cromosoma huésped con la correspondiente represión de los genes bacterianos. La inserción y la separación tienen requerimientos enzimáticos distintos y el virus puede controlar la dirección de ambos procesos regulando en un sentido u otro las actividades de la integrasa y excisionasa.

La reacción de la integrasa observada en el fago lambda y similares constituye el primer caso conocido en el que dos moléculas de ADN se cortan y unen por puntos específicos como parte del ciclo biológico normal de un organismo. Las experimentos "in vitro", consistentes en la rotura enzimática del ADN y su posterior unión, se han convertido en una práctica usual para los bioquímicos, aunque, en realidad, los enzimas restrictivos bacterianos utilizados funcionan más para degradar al ADN que para la recombinación genética. Todavía no se conocen las secuencias de nucleótidos sobre las que actúa y a las cuales reconoce la integrasa. Los resultados "in vivo" exigen que las secuencias vírica y bacteriana sean distintas, ya que los requerimientos para la inserción y separación no son los mismos.

El estudio de la inserción del ADN del fago lambda ha proporcionado conocimientos muy útiles, como el del proceso específico de rotura y unión de moléculas de ADN aplicables a otros trabajos bioquímicos que abren la posibilidad de un control de translocación de segmentos de ADN en otros organismos. Otra aportación muy interesante es el descubrimiento de variantes víricas transductoras, verdadero caballo de batalla de los biólogos moleculares, porque les permite replicar segmentos específicos de ADN del huésped separados del resto del cromosoma. Además, la comprensión del mecanismo de integración vírica ha servido para definir las interacciones funcionales entre elementos integrados y cromosomas. En este sentido, son útiles los ejemplos de integración anormal de genes conocidos, como el caso de la integración del ADN del fago lambda en el gen *trpC*

El trabajo de Charles Yanofsky, de Stanford, y otros, ha mostrado que el operón *trp* consta de cinco genes, cada uno de los cuales codifica a un enzima distinto que cataliza una etapa específica de la biosíntesis del triptófano; los genes se denominan *trpA*, *trpB*, *trpC*, y así sucesivamente. Este fragmento completo de ADN se transcribe en un ARN mensajero, como una unidad que comienza en el gen *trpE* y continúa al *trpA*. El ARN mensajero se fija posteriormente a los ribosomas, partículas subcelulares en donde tiene lugar la síntesis enzimática. Cerca del comienzo del fragmento transcrito se encuentra una secuencia específica de nucleótidos llamada operador. En presencia de concentraciones elevadas de triptófano, se une al operador un represor proteico que inhibe la transcripción del segmento completo de ADN. Es decir, cuando la célula necesita triptófano, se sintetizan conjuntamente los cinco enzimas, pero, en presencia de cantidades importantes de triptófano, esta síntesis no tiene lugar. Se trata, pues, de un control por producto final, o *feedback control*, mecanismo común a muchos operones.

¿Cuáles son los cambios que produce la inserción del ADN del fago lambda? En primer lugar, al localizarse el ADN del fago lambda en la mitad del gene *trpC*, no puede formarse el enzima completo del gene. Una bacteria que lleve el profago anormalmente inserto está incapacitada para la síntesis del triptófano, toda vez que no se produce uno de los enzimas necesarios de su vía metabólica. A partir de esta bacteria lisogénica se pueden obtener descendientes que hayan perdido el fago. En estas bacterias, las dos mitades del gene *trpC* están nuevamente reunidas y, por consiguiente, se restablece la síntesis del enzima. En definitiva, el ADN del gene *trpC* no ha sufrido daño alguno; sólo que no puede codificar su producto normal cuando se encuentra dividido en dos mitades.

Además de producir la disrupción del gene *trpC*, el profago afecta a la totalidad del operón *trp* como unidad funcional. Como en el caso del operón *trp*, la transcripción del ARN procede a lo largo de los segmentos de ADN a partir de un punto de iniciación concreto hasta una

señal de paro. No se conoce de un modo preciso la naturaleza de estas señales de paro; sin embargo, en el ADN del fago lambda deben existir varias. En este tipo de bacterias lisogenizadas por el fago lambda se sintetizan normalmente los enzimas codificadas por los genes *trpE* y *trpD*, pero en ningún caso se logra la transcripción de los genes *trpA* y *trpB*.

De este modo, el profago puede constituir una barrera para la transcripción del ARN, aunque los puntos de unión entre el ADN vírico y el ADN bacteriano no constituyen en sí mismos ningún obstáculo. Aunque no se alcancen los genes *trpA* y *trpB*, la transcripción bacteriana puede reprimirse por producto final, es decir, por el triptófano; sin embargo, existe otra transcripción, originada a partir del profago, que continúa a través de la unión entre el ADN vírico y el de la célula huésped disparando la expresión, limitada, de los genes *trpA* y *trpB*; es independiente de la represión por producto final. La transcripción vírica incluye un solo gene vírico conocido, el de la integrasa, que se expresa a bajo nivel, aunque los restantes genes del virus están reprimidos.

La transcripción del ARN a través de las fronteras de la bacteria lisogénica anormal ilustra alguna de las consecuencias que traen consigo los procesos de inserción del ADN vírico respecto a la evolución y la regulación de la función celular. Como quiera que la inserción puede originar nuevas unidades regulatorias, podemos pensar que la selección natural actuará sobre ellas optimizando su valor selectivo. Desconocemos hasta qué punto ha podido incorporarse ADN de origen vírico en los sistemas regulatorios de los cromosomas.

Esta problemática constituye un antiguo dilema entre aquellos virólogos que consideran al virus como un invasor y los que lo interpretan como un componente celular normal que se ha liberado de los controles regulatorios establecidos. La mayoría de las veces, esta pugna afecta más a la definición que al contenido. Sin embargo, conforme aumenta el conocimiento de estos procesos, se recurre a otros niveles de complicación. Las bacterias lisogénicas han constituido un ejemplo de vital importancia para los defensores de la segunda hipótesis. En la actualidad, se conoce su alcance: el concepto del profago como un componente normal de las células no es algo irrelevante. El profago no sólo se comporta como una parte integral del cromosoma huésped; lo es, sencillamente. Por su modo de integración, el ADN vírico no puede distinguirse del ADN huésped.



El arte de los iberos: escultura y pintura

La escultura y la pintura ibéricas son netamente originales, si bien responden a estímulos aportados por las corrientes colonizadoras de los pueblos del Mediterráneo oriental

Miquel Tarradell

Una larga tradición erudita e investigadora, que parte del Renacimiento, ha estudiado y valorado las aportaciones artísticas de griegos y romanos, hasta el punto de que su conocimiento ha entrado como algo corriente en la formación de toda persona culta de nuestros días. Pero es menos conocido que, en otras áreas del Mediterráneo antiguo, concretamente en su zona occidental, existieron, en unas fases más o menos contemporáneas a las del arte clásico, otros pueblos que nos han legado unas artes originales. Sin que puedan competir con la básica aportación grecorromana, y sin que hayan tenido en la historia una influencia, ni de lejos, semejante, presentan valores que la investigación moderna va desentrañando, sobre todo, a medida que los hallazgos arqueológicos nos ofrecen materiales de estudio cada día más ricos, más complejos y más explícitos.

Dentro de este grupo, el arte etrusco ocupa un lugar destacado. Otro menos espectacular, pero de singular interés, es el representado por las producciones cartaginesas, tanto de la metrópoli, Cartago, como de las ciudades que se extendieron por amplias zonas de las costas del occidente mediterráneo. El caso de los iberos, que vamos a tratar aquí, es, sin duda, un caso extremo entre las artes del Mediterráneo antiguo poco conocidas, si exceptuamos el círculo limitado de especialistas. Su explicación, como veremos, se debe a la modernidad de los descubrimientos y de los estudios, todos los cuales prácticamente han tenido lugar dentro de nuestro siglo, frente a la vieja tradición estudiosa de que han gozado otras producciones artísticas, más o menos hermanas, de otras civilizaciones.

LA DAMA DE BAZA constituye el más reciente de los grandes hallazgos de escultura ibérica. Apareció en las excavaciones de una necrópolis que correspondia a la antigua *Basti*, ciudad próxima a Baza (Granada), presidiendo una tumba, que, por su ajuar, se fecha en el siglo IV a. C. (Museo Arqueológico Nacional).

Las producciones artísticas surgen de una sociedad determinada, es decir, vienen configuradas por un contexto temporal y social. Para comprender el arte ibérico, conviene que nos planteemos previamente el esquema, por lo menos en sus líneas básicas, del mundo de los iberos en general.

Los iberos formaron un pueblo ubicado en la zona del litoral mediterráneo de la Península, que comprendió los territorios de lo que actualmente es Cataluña (incluidos el Rosellón y el extremo meridional del Languedoc), la zona del valle del Ebro aragonés hasta las proximidades de Zaragoza, el País Valenciano, Murcia y buena parte de Andalucía, si bien en la zona andaluza existe una cierta interferencia entre mundo ibérico y mundo tartésico. Digamos, siquiera sea de pasada, que, como resultado de los estímulos coloniales, ya en los siglos VII y VI a. C., la sociedad tartésica había adquirido una serie de rasgos que la emparentan con las altas culturas urbanas del Mediterráneo oriental y que recuerdan hasta cierto punto los que por las misma época se manifiestan en Etruria.

El resto de la Península no se vio afectado por el fenómeno ibérico, como tampoco las Islas Baleares, a pesar de hallarse en frente de la costa 'ibérica'.

Los escritores griegos aportan las primeras referencias a los iberos en el siglo V a. C. Los modernos hallazgos arqueológicos confirman que, en efecto, en esta fecha la cultura ibérica, con su arte, estaba ya formada y había cuajado en sus líneas esenciales. Su momento final no puede fijarse en unas fechas muy concretas, ya que deriva de un proceso de aculturación: en efecto, el mundo ibérico murió como consecuencia de la incorporación de los iberos a la civilización romana, hecho que tuvo lugar paulatinamente después de la conquista.

Roma domina el territorio de los iberos en torno del año 200 a. C., en secuencia a la expansión provocada por el reto cartaginés de Aníbal, durante la segunda Guerra Púnica. Pero la sociedad ibérica no se desintegró inmediatamente después de la conquista. Mantuvo su personalidad y su originalidad durante un siglo y medio o dos siglos más. No será hasta las décadas inmediatas al cambio de Era, entre el año 50 a. C. y los primeros de la centuria siguiente, cuando veremos desaparecer los elementos típicos que habían configurado aquella sociedad, y entre tales elementos extintos se hallarían las producciones artísticas. Entre el siglo V a. C. y los albores de la era cristiana, es decir, durante medio milenio aproximadamente, se desarrolla y muere el arte ibérico.

El proceso del descubrimiento

Como ocurrió con tantos aspectos históricos del Mediterráneo antiguo, la primera información de que pudieron disponer los estudiosos se recogió de la lectura de los textos clásicos, griegos y latinos: textos que ya fueron editados y trabajados hace siglos. Los iberos no eran, pues, unos desconocidos para la historia tradicional. Se sabía su ubicación, con sus límites aproximados. Se pudo averiguar asimismo que no se trataba de una

sociedad políticamente unificada, sino que estaban divididos en una serie de pueblos o tribus, de extensión desigual, cuyos nombres recogen los mencionados textos. Y los escritos dan cuenta también de los nombres de algunos de sus jefes, en particular, de los que desempeñaron un papel preponderante en las luchas de resistencia contra la ocupación romana.

Pero quedaban en la sombra muchos aspectos decisivos de la sociedad ibérica. Entre ellos, el arte, sobre el que no hallamos ni la más mínima referencia en los textos clásicos.

El conocimiento ha venido siendo una función en estrecha dependencia de los hallazgos arqueológicos. Curiosamente, el hecho es bastante moderno. A nuestra mentalidad le resulta difícil aceptar que los arqueólogos anteriores a las postrimerías del siglo pasado no hubieran fijado su atención en los ejemplares que, sin duda, aparecieron en su tiempo; tales tipos de hallazgos al azar de vestigios importantes no son raros. Pero los interesados por el arte antiguo y por la arqueología, formados en la tradición renacentista o dieciochesca, despreciaban todo cuanto estuviera al margen de las normas grecorromanas, que eran las únicas que se consideraban perfectas y dignas de estudio. Y así, desde el siglo XVI, por lo menos, tenemos recolecciones y estudios de estatuas o mosaicos, de inscripciones o de otros elementos romanos hallados en la misma zona donde después surgieron vestigios iberos. Estamos, pues, ante uno de tantos ejemplos de un fenómeno bien conocido, si bien no siempre suficientemente valorado: que, en el campo de la investigación, sólo se halla lo que se busca.

GRAN DAMA OFERENTE del Cerro de los Santos, una de las de mayor tamaño y de mejor calidad de este famoso conjunto de esculturas en piedra, ofrecidas por los fieles que visitaban el santuario manchego. Esta denominación se debe a los hallazgos allí realizados, de orantes y devotos.

Cuando, desde principios del siglo XIX, se comienzan a conocer y a estudiar los restos de las grandes culturas del Próximo Oriente, cambia la mentalidad, y cambia también la sensibilidad de los historiadores del arte, abriéndose hacia las artes exóticas al mundo clásico. No es por azar por lo que la valoración artística de los iberos sea contemporánea, por una parte, a los descubrimientos de Micenas y Creta, y, por otra, a la moda, común en la Europa de fin de siglo, de las artes del Extremo Oriente o del Africa negra.

El descubrimiento comenzó por la escultura, por un numeroso lote de figuras de piedra, que representaban a orantes o devotos, algunos de tamaño casi natural. Se hallaron hacia 1870 en lo que había sido un antiguo santuario de los iberos en el lugar llamado popularmente Cerro de los Santos (precisamente porque las figuras, que ya debían de haber aparecido anteriormente, eran identificadas como "santos"), en el término de Montealegre del Castillo, en el extremo SE de la Mancha (provincia de Albacete). Pero el paso decisivo no se dio hasta un cuarto de siglo después, cuando apareció, en unos trabajos agrícolas, el busto que posteriormente se ha conocido con el nombre de La Dama de Elche, por el lugar de su hallazgo, en el extremo meridional del país valenciano (provincia de Alicante). Era en 1897. La efigie femenina pronto pasó al Museo del Louvre, de París, donde llamó muy

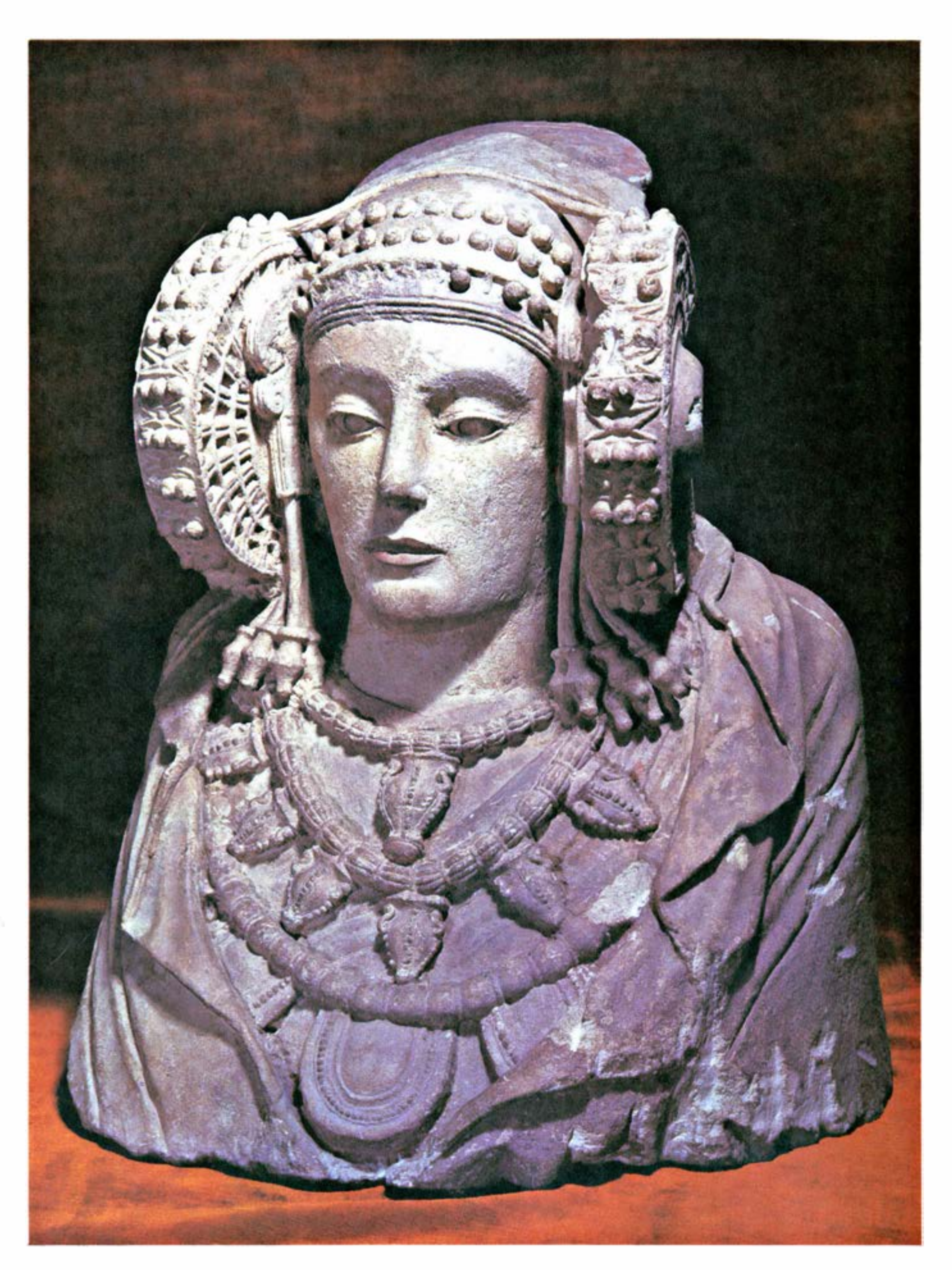
pronto la atención de destacados especialistas.

El estudio del arte ibérico se internacionalizaba. Surgían discusiones sobre su estilo, sobre sus autores, sobre las influencias artísticas que reflejaba. A partir de ese momento, ya no se podía desconocer la existencia de la escultura ibérica, la cual permitía seriar algunos de los raros hallazgos anteriores, y que pronto vino a ver sus series incrementadas por nuevas apariciones.

Entretanto, nacía en España la arqueología científica, una de cuyas tareas a cumplir era la exploración del territorio. Los enigmas que planteaban las esculturas sólo podrían comenzar a tener respuesta si se podía estudiar globalmente la sociedad que las creó. Comenzaron a situarse los poblados ibéricos, cuyos restos, a pesar de no contener edificios destacados, eran fácilmente identificables a través de otro de los elementos típicos de los iberos: su cerámica.

La cerámica fue el segundo de los grandes descubrimientos. Tuvo lugar a partir de principios de siglo. Uno de los elementos novedosos incorporados por los iberos a sus técnicas, resultado de las influencias de sus contactos con fenicios y griegos, fue el torno de alfarero. De forma que fueron los primeros indígenas del área en cuestión quienes usaron cerámica fabricada a torno, frente a las producciones exclusivamente a mano típicas de los pueblos anteriores. Las superficies lisas que da el torno se prestan a ser pintadas. Así surge la cerámica ibérica, que es, junto con la escultura, la creación destacada de esta civilización en el campo del arte.

El descubrimiento de las cerámicas pintadas estuvo a punto de desviar la comprensión histórica de los iberos (y lo consiguió durante un breve período). La semejanza de determinados motivos con los micénicos alentó la hipótesis de que la pintura ibérica sería contemporánea y, en parte, procedería del arte pictórico de Micenas. Tal suposición abría la puerta a dos errores: 1) fecharla en la mitad del segundo milenio antes de Cristo: 2) creer que los micénicos habían navegado intensamente hasta las costas del extremo occidental del Mediterráneo. Pronto pudo observarse, sin embargo, que la cerámica pintada, como el resto de las producciones ibéricas halladas en las excavaciones, iban asociadas a cerámicas griegas nunca anteriores al siglo V a. C., con producciones griegas, helenísticas o romano-republicanas posteriores a esa fecha. A pesar de su arte arcaizante, y de ciertos paralelos formales con detalles de la pintura micénica, había que situarla en la segunda mitad del primer milenio antes de la era cristiana; es decir, nada menos que mil años después de lo que habían sugerido algunos de los primeros investigadores.



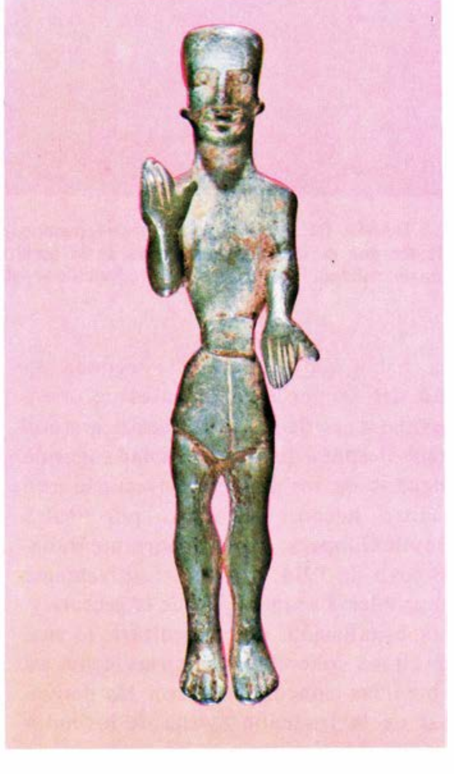
LA DAMA DE ELCHE es un busto femenino que debe su nombre al lugar de su hallazgo. A pesar de ser una de las primeras piezas de la escultura ibérica que se conoció, continúa siendo la de mayor calidad. Probablemente tuvo función sepulcral. Se halla en el Museo Arqueológico Nacional.

Este hecho, destacado por Pedro Bosch Gimpera, en un importante trabajo suyo de 1914, centró definitivamente el problema cronológico de la pintura y, por asimilación, de la escultura, lo cual resultaba coherente, ya que las fechas así obtenidas concordaban con las derivadas de la tradición escrita de los autores griegos y latinos.

En los años de la Primera Guerra Mundial, cuando la investigación había alcanzado los primeros resultados sólidos, se habían realizado todavía muy pocas excavaciones. El desarrollo de centros de investigación destinados a sistematizar la arqueología de campo, en Madrid y en Barcelona, permitió excavar a escala considerable algunos poblados y necrópolis. Esos trabajos posibilitaron un mayor conocimiento de otros aspectos de la vida de los iberos y ampliaron el panorama artístico. Si la escultura era, en principio, la escultura en piedra, de tipo monumental, surgían las terracotas y las pequeñas figuritas de bronce, ligadas en ambos casos a los santuarios. Las variedades estilísticas de la cerámica pintada se multiplicaban, pudiéndose fijar áreas diversas en las que se daban determinados estilos, que no alcanzaban más que una parte del territorio ibérico. Se ponía de relieve un hecho: lo más sobresaliente del arte ibé-



BICHA DE BALAZOTE, así llamada por proceder del pueblo del mismo nombre en la provincia de Albacete. Bicha es el nombre popular de las figuras de piedra ibérica, que representan animales reales o fantásticos, que constituyen uno de los elementos que enlazan la escultura ibérica con las corrientes del Mediterráneo oriental. Entre éstas, destacaron las representadas por los fenicios.



LOS DEVOTOS que acudían a los santuarios de la zona de Sierra Morena, en Andalucía, se hacían representar como orantes en pequeñas figuras de bronce. Su número es muy crecido y su calidad muy diversa, así como su cronología. La pieza de la izquierda forma parte de la colección del Museo Arqueológico de Madrid, la más nutrida. El personaje masculino, de la derecha, que es un bronce de la misma procedencia que el anterior, aparece en actitud de ofrenda. Obsérvese la notable diferencia de estilo y calidad de estas piezas. La segunda se halla en el mismo museo.

rico se limita al área meridional, sobre todo en el campo de la escultura, pero también en pintura sobre cerámica.

A medida que proseguían las excavaciones, se comprobaba cómo el arte de los iberos giró en torno a dos aspectos fundamentales: escultura (en sus distintas variantes) y pintura. No hallamos, paralelamente, una arquitectura monumental notable, si bien existen murallas en algunos poblados, levantadas con un gran esfuerzo y vigorosa técnica; ni tampoco encontramos una orfebrería comparable en calidad artística.

La escultura

En razón del material empleado, podemos dividir la escultura ibérica en tres grandes grupos: la escultura en piedra, los bronces y las tierras cocidas. La escultura en piedra puede llegar a alcanzar en algunas piezas de figuras humanas tamaños casi naturales; los otros dos grupos son de pequeñas figurillas.

Cabe señalar que tal distinción triple si bien es cómoda porque facilita la presentación, no responde a las realidades funcionales. Desde este punto de vista funcional podríamos dividir la escultura en escultura de los santuarios (con valor de ofrenda, de exvoto) y escultura funeraria, que se colocaba en las tumbas. Podían ser figuras femeninas, como La Dama de Elche y La Dama de Baza, o bien figuras de animales, con frecuencia fantásticos y mitológicos.

Los grandes lotes procedentes de un solo lugar corresponden siempre a santuarios. Presentan gran diversidad por las materias empleadas e incluso por la temática. El primer conjunto conocido fue el del Cerro de los Santos de Montealegre del Castillo (provincia de Albacete), santuario en donde las ofrendas consistían en figuras de oferentes, en piedra. El mismo caso es el del Llano de la Consolación, vecino del anterior. En cambio, en el de Cigarralejo de Mula (provincia de Murcia), que debió estar presidido por una divinidad protectora de los caballos, las ofrendas consisten en relieves en piedra de pequeño tamaño que representan équidos. En la zona jienense de Sierra Morena existen dos santuarios, los del Collado de los Jardines y Castillar de Santisteban, donde a lo largo de los siglos los devotos depositaron millares de pequeños bronces, representando figuras masculinas, con frecuencia guerreros, o femeninas; allí, las terracotas son rarísimas y no existen esculturas en piedra. Por el contrario, en el santuario situado en la cumbre del monte de La Serreta, junto a un poblado,

en las cercanías de Alcoy (Alicante), las ofrendas son todas pequeñas figuras de tierra cocida, sin ninguna muestra de figurillas de bronce o en piedra.

No disponemos de información suficiente respecto de las piezas con función funeraria, pues raramente se han hallado piezas en buenas condiciones para su estudio científico. Es evidente que La Dama de Elche presidía una sepultura, cuyo ajuar fue exhumado con ella, y se ha podido estudiar. Pero La Dama de Elche, así como el destacado conjunto de fragmentos de piezas en piedra, de notable tamaño y buena calidad, procedentes del mismo yacimiento, no son descubrimientos "in situ". Resulta más problemático todavía el caso de las figuras de animales, pues no hay una que proceda de excavaciones; cabe sospechar que están relacionadas con las necrópolis. Dos hallazgos recientes nos ilustran de la asociación de la gran escultura en piedra con las tumbas. El primero se refiere al realizado en el Corral de Saus, en Mogente (provincia de Valencia), que representa a varias figuras femeninas tendidas; el segundo, de valor excepcional, es el de Pozo Moro, en la misma zona de los santuarios del Cerro de los Santos y del Llano de la Consolación, en donde acaba de excavarse un edificio funerario decorado con varios relieves, que suponen una gran novedad por sus temas y por su estilo, pendiente todavía, sin embargo, de un estudio definitivo.

Frente al uso del mármol, corriente y típico en las producciones grecorromanas, o de las piedras duras, características del arte del Próximo Oriente, en especial del egipcio, los iberos emplearon materiales de inferior calidad: calizas y piedras locales. Su trabajo resultaba más fácil y no había necesidad de desplazarse grandes distancias para su búsqueda. Siguiendo la tradición general del mundo antiguo, las piezas eran policromadas, pero raramente se conserva el color o incluso vestigios de policromía. Tales vestigios son visibles en La Dama de Elche y se han conservado excepcionalmente bien en La Dama de Baza.

En el primer caso se trata de un busto; en el segundo, una figura femenina sentada en un trono. Las dos figuras aparecen ricamente ataviadas, con peinados complicados y adornos en la cabeza. La Dama de Elche, en concreto, se engalana con diademas y grandes discos laterales.

El prototipo de las figuras oferentes femeninas de los santuarios manchegos nos la ofrece la pieza más destacada del grupo, la llamada Gran Dama del Cerro de los Santos.



UNA DE LAS GRANDES REVELACIONES de la pintura ibérica se nos ofreció con el descubrimiento de las cerámicas del poblado de San Miguel de Liria, cerca de Valencia. Incluso en piezas fragmentadas, como la que reproducimos, se aprecian las particularidades del estilo narrativo.

Es una figura de estilo hierático, que observa rigurosamente la ley de la frontalidad, de pie, cubierta con un gran manto, que sostiene con ambas manos, pegadas al cuerpo y a la altura de la cintura, un vaso de ofrenda. En tamaño menor, y casi siempre también con menos calidad, el tipo se reitera entre las ofrendas del mismo santuario.

La serie animalística forma un mundo sugestivo y variado, siempre dentro de una gran homogeneidad conceptual y estilística, matices de calidad aparte. Se trata de representaciones de animales reales, casi siempre leones (o leonas) y toros, o bien simbólicos, como esfinges, grifos, a veces denominados por el pueblo, incapaz de identificarlos, con el nombre vago de "bichas", que han conservado en las publicaciones, como la de Balazote, en la zona de Albacete. Son los mismos tipos animalísticos que conocemos en Oriente y en el este del Mediterráneo, de donde procede la idea seguida por los iberos, animales a los que se atribuía carácter sagrado, protectores del hombre y también de los muertos. Ignoramos la disposición en que se encontraban, pero algunos formaron parte, sin duda, de pequeños edificios sepulcrales.

Su área corresponde siempre al sector ibérico meridional, como ya hemos indicado a propósito de las figuras humanas. Una cabeza de toro de Turis, no lejos de Valencia, y un toro de Sagunto son, hoy por hoy, el testimonio más septentrional.

El relieve es menos abundante que la escultura de cuerpo entero. Salvo algunos ejemplares mediocres, su área corresponde a la anterior. Ya hemos mencionado el numeroso lote de los caballos votivos del santuario del Cigarralejo. El extremo occidental viene señalado por las notables piezas de Osuna (provincia de Sevilla). El ejemplo de Pozo Moro, citado, nos ilustra hasta qué punto podemos esperar sorpresas a través de nuevas investigaciones.

Los bronces constituyeron, al parecer, una producción muy concentrada. Mientras son escasas las figuritas broncíneas en el área ibérica en general, los dos santuarios de Sierra Morena (Castillar de Santisteban y el Collado de los Jardines) han aportado millares de piezas. Aparte de los museos que disponen de colecciones numerosas, no es raro hallar pequeños lotes repartidos en museos lejanos o en colecciones privadas. Hubo en la comarca una escuela de broncistas que trabajó durante siglos, quizá desde el VI, o con seguridad desde el V antes de C., hasta bien entrada la época de la romanización; no sabemos si hasta el momento final de los santuarios, que siguieron viviendo en el siglo IV de

nuestra Era, cuando el estado romano acabó con los centros de culto paganos. Se trata de una zona minera, por lo que el metal no ofrecía problemas.

Realizados con la técnica de la cera perdida, las piezas tenían que ser necesariamente pequeñas, ya que son macizas; raramente alcanzan más de 10 cm. Fabricadas a molde, eran retocadas después. En general, parece que las más cuidadas pertenecen al período inicial. Son figuras ya masculinas, ya femeninas, de pie, con los brazos en posición de plegaria o de ofrenda. A veces, los hombres llevan armas, ofensivas o defensivas. También aparece algún jinete.

No todos los devotos estaban en condiciones de adquirir piezas caras. Por ello, abundan las que alcanzan, a veces, un esquematismo extremado; en algunos casos, la figura humana de pie se reduce y estiliza al máximo. A su lado existen ejemplares muy notables, que recuerdan de cerca modelos griegos arcaicos, los cuales debieron ser los originales de donde partió la serie, o las series.

Al igual que los bronces, *las terracotas* se concentran también en un lugar determinado, en este caso, en el santuario de La Serreta de Alcoy. El país valenciano no dispone de las posibilidades de metal de Andalucía; y así, la rareza de la materia prima explica el uso de la arcilla. Por los temas y por las preferencias estilísticas, nos hallamos asimismo en otro ámbito. Predominan las figuras femeninas de distintos tipos, pero existen también representaciones de hombres. Los estilos son variados. Desde simples muñecos de factura muy popular, cual si se tratara de trabajos infantiles, hasta las que derivan de estatuillas helenísticas. Mantienen, sin embargo, un estilo ibérico, propio, que nos asegura que en ningún caso se trata de importaciones. Realizadas a molde, son, como los bronces de Despeñaperros, producciones en serie destinadas a un amplio consumo, sin que ello implique pérdida de vigor; una fuerza que, incluso en nuestros días, llegaría a impresionar al propio Picasso.

La pintura

Contrariamente a las producciones escultóricas, la pintura sobre cerámica ocupa de hecho toda el área ibérica; no es ningún fenómeno zonal. Si bien hallamos superficies de vasijas pintadas por doquier, tampoco en este caso estamos ante un arte uniforme. Los tipos más simples, las decoraciones geométricas elementales, que se pueden obtener aplicando simplemente un pincel empapado en color sobre la pieza mientras el torno rueda, son generales, pertenecen a todo el mundo ibérico. Los estilos más complejos, con decoración vegetal combinada con decoración geométrica, no existen en algunas zonas, o se presentan raramente. Los estilos que comportan la presencia de figuras se centran, sin embargo, en tres áreas específicas.

El estilo simbólico se circunscribe al territorio que se encuentra a caballo del país valenciano y Murcia. En honor de los dos yacimientos más típicos, recibe la denominación de estilo Elche-Archena. El estilo narrativo, con la aparición de escenas que "narran" hechos o leyendas, aparece en las comarcas centrales del país valenciano; por las mismas razones que en el caso anterior, es conocido con la etiqueta de estilo Oliva-Liria, los dos máximos yacimientos de esta zona en cuanto a aportación de materiales. Se prolonga, según hallazgos posteriores, hacia la zona aragonesa del valle del Ebro (poblado de Alloza). Cerca de este lugar, en Azaila, encontramos un estilo propio, que combina figuras animales o humanas con decoraciones barrocas a base de motivos vegetales (o geométrico-vegetales), y que, según el conocimiento actual, parece una escuela o taller de difusión limitada.

Artísticamente, los dos grupos más importantes son el simbólico (Elche-Archena) y el narrativo (Oliva-Liria). El simbólico se caracteriza por la representación de animales de tamaño grande en relación con el de la pieza, enmarcados por frisos decorativos. De todos ellos, el águila, con alas abiertas, o el lobo, son los más comunes. Cuando aparece la figura humana presenta también el mismo carácter estático en la representación; se ha descubierto una mujer alada que debe identificarse con alguna divinidad, aunque no necesariamente con la cartaginesa Tanit, como se ha sugerido sin bases sólidas de apoyo. Por su estilo y ejecución, es la pintura cerámica ibérica más refinada que conocemos, lo que no debe sorprendernos ya que proviene de un área que había alcanzado uno de los puntos más altos de madurez urbana de todo el ámbito ibérico.

El estilo narrativo, más popular en el concepto y en la ejecución, posee, sin embargo, un mayor poder atractivo para los ojos del hombre moderno. En especial, destaca el gran lote hallado en el poblado de San Miguel de Liria, cerca de Valencia. Se han hallado escenas con intervención de multitud de figuras, de pequeño tamaño por lo general. Son muy corrientes las de caza, en las que jinetes armados con lanzas atacan a lobos o a cérvidos, o luchas entre grupos armados, a pie y a caballo o incluso en barcas; excepcionalmente, aparecen también otros temas, como una danza en que los ejecutantes actúan dándose las manos, lo que ha sido considerado como un lejano precedente de la sardana, la danza popular catalana que todavía subsiste.

Dentro de una concepción homogénea en lo que se refiere a las representa-

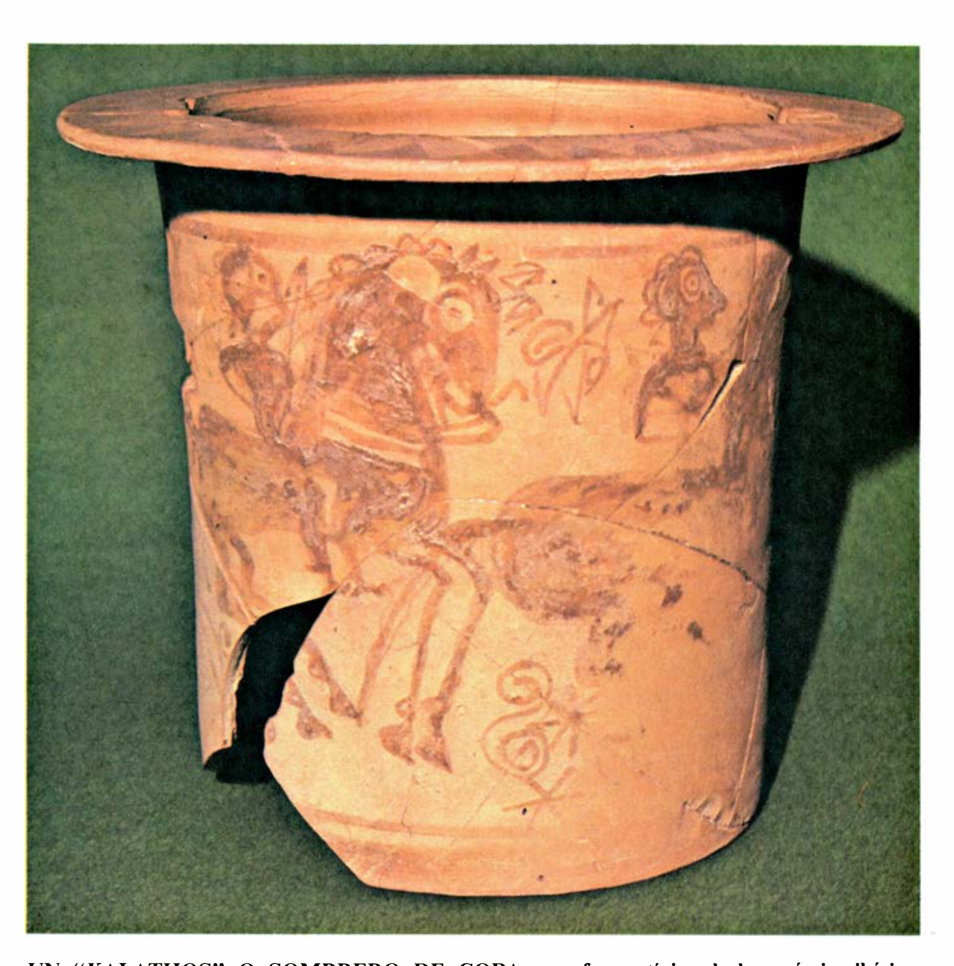


EL LLAMADO VASO DE LOS GUERREROS, de S. Miguel de Liria, típico del estilo de ese famoso poblado, por la forma de representar a las figuras humanas y al caballo, por la composición de la escena y por los elementos decorativos del fondo es la mejor manifestación del "horror vacui" general en este estilo narrativo de la pintura. (Museo de Prehistoria de Valencia).

ciones, existen variedades de ejecuciones y de calidades incluso dentro de las series procedentes de un solo poblado, como en el caso de Liria; y ello, desde las figuras planas, con el cuerpo relleno, hasta las que intentan fijar los detalles interiores de las figuras. Mucho más arriesgado resulta pasar de las consideraciones puramente estilísticas al desentrañamiento de los significados. En el caso de Liria, sería capital para su comprensión poder traducir los letreros que las completan; hasta ahora solamente se ha podido leer –es decir, transliterar– a nuestro alfabeto el sistema de escritura ibérico; su traducción resulta imposible por falta de conocimiento del idioma, y los apasionados ensayos realizados hasta hoy, en especial a través del vasco, no han llegado a resultados concluyentes.

La versión más aceptada es que se trata de figuraciones de la vida real, algo así como una crónica de lo que sus autores veían a su alrededor. Conviene considerar, sin embargo, que no sabemos nada de la mitología ni de las leyendas de los iberos. Para un profano, cualquier representación grecorromana en la que se aprecia a un hombre luchando contra un león no será otra cosa que una escena de caza, pero el conocedor puede identificar un episodio de la vida mítica de Hércules, y los ejemplos de este tipo serían innumerables. En este sentido, los tratadistas han sido quizá poco prudentes, y no es imposible que si la fortuna acompaña a futuras investigaciones, algún día puedan interpretarse las narraciones de esas cerámicas ibéricas a la luz de mitologías o leyendas indígenas.

En el plano técnico, las variantes de los diversos estilos residen en la temática. Por lo que respecta a la ejecución, la falta de policromía es común a toda la pintura ibérica. El color es siempre similar. Sobre el fondo rojizo claro de las paredes (la cerámica está cocida a temperaturas altas, que se aproximan a los 1000 grados, y es de buena calidad), se pintó con un color rojizo-amarronado, vinoso, que, salvo pequeñas variantes de matiz, lo hallamos en toda el área ibérica. El colorido no influye, por tanto, en la fuerza de la expresión, que viene determinada por el dibujo, como en toda representación monocroma.



UN "KALATHOS" O SOMBRERO DE COPA, una forma típica de la cerámica ibérica, procedente de San Miguel de Liria, decorada con jinetes. Las figuras alcanzan toda la altura lateral de la vasija, para lograr su tamaño máximo (Museo de Prehistoria de Valencia).

Artistas y clientela

Lo que menos curiosidad científica ha despertado son los aspectos sociales del arte ibérico, su mecanismo de vinculación con la sociedad.

¿Cómo se desarrollaron los talleres? He aquí una pregunta poco estudiada. Por lo que respecta a los pequeños bronces de Sierra Morena o a las terracotas de Alcoy, no hay problema: es evidente que se trata de producciones locales, de talleres que se establecieron en las proximidades de los santuarios en función de una clientela concentrada. Mas para la gran escultura de piedra, la cuestión es más compleja. Existe el hecho de la homogeneidad de estilo, por lo menos entre las producciones más destacadas, que nos delatan talleres y escuelas con sus propias tradiciones, así como la comprobación de que, dado el peso de los bloques y de las piezas, y las dificultades de transporte, la mayoría debieron ser talladas cerca del lugar en que tenían que estar colocadas. ¿Por escultores ambulantes, que podríamos comparar a los de las catedrales románicas o góticas?

La pintura está en íntima relación con los alfares. Junto a los hornos se pintaban las vasijas, y, si bien han podido ser estudiados varios hornos ibéricos en distintas áreas, ninguno corresponde a los núcleos de producción de los estilos más importantes.

Los problemas del arte ibérico

Después de nuestro rápido esquema descriptivo, hemos de enfrentarnos ahora con algunos de los problemas que surgen cuando intentamos penetrar en su comprensión. El primero, obviamente, es el de la cronología.

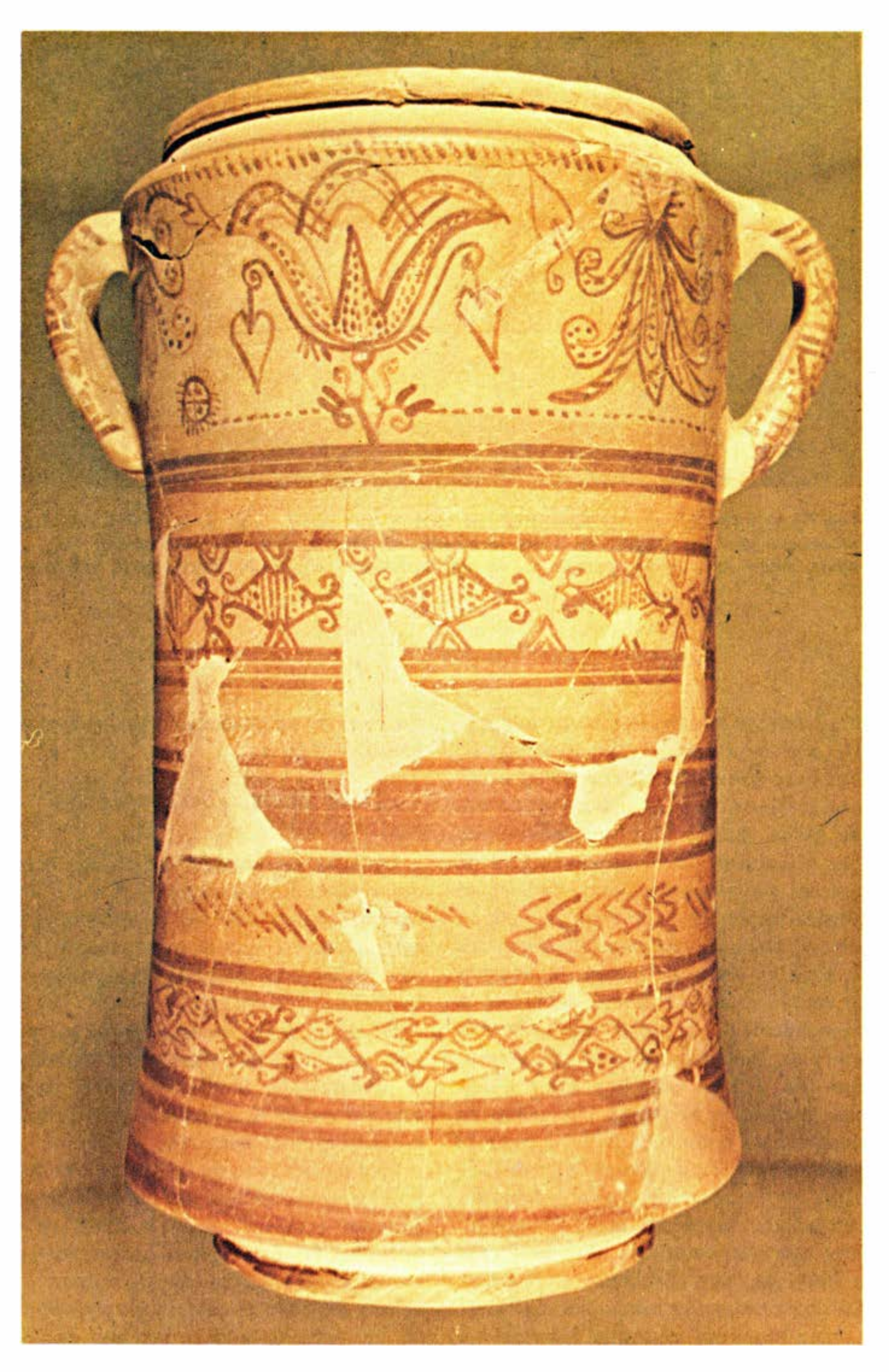
De poder saber *cuándo*, en qué etapas y en qué forma de sucesión se desarrolla el arte ibérico, tendría una base para detectar posibles influencias y para conocer su evolución interna.

Este ha sido uno de los temas más debatidos, precisamente por su carácter de cuestión previa y, quizá también, porque, para los arqueólogos, los problemas cronológicos resultan más familiares. Ya hemos indicado el desfase, de alrededor de un milenio, que se produjo en los primeros tiempos del estudio. Las discusiones tendieron, medio siglo después, a caer en el extremo opuesto. En torno de los años 1940-1950, algunos ilustres

tratadistas, encabezados por A. García y Bellido, llegaron a suponer que la escultura y la pintura ibéricas se habían desarrollado en los tiempos inmediatamente anteriores al cambio de Era, cuando los romanos ya había conquistado el país. En consecuencia, el arte ibérico hubiera resultado un arte provincial romano, una respuesta de los indígenas a las corrientes romanas, una imitación del arte de los dominadores, asimilada a su modo.

Hoy existen bases suficientes para rechazar esta visión, pues los comienzos se fechan en torno del siglo VI y a principios del V a. C.

Dentro de estos cinco siglos, por lo menos, de duración hay que distinguir dos grandes fases históricas. La primera, hasta la segunda mitad del siglo III, cuando la sociedad indígena se desarrolla en libertad y cuando recibe, por otra parte, las más fuertes influencias fenicias y griegas a través de los contactos comerciales con ambos pueblos. La gran aventura de la segunda Guerra Púnica y la conquista romana del territorio ibérico, que tiene lugar entre 218 (desembarco de los romanos en Emporion) y 197 (organización del territorio ocupado) abre una nueva época. A partir de entonces, los iberos producirán sus creaciones cada vez más presionados indirectamente –es decir, no por coacción declarada– por el peso de la cultura romana y de la penetración sociopolítica y económica de los dominadores.



EL ESTILO DECORATIVO, que combina motivos geométricos con otros vegetales –con frecuencia estilizados– alcanzó mayor difusión geográfica que la pintura de figuras humanas. Este vaso de Liria, hermano de los anteriores por su lugar de origen, manifiesta que en el área de los estilos simbólico y narrativo coexistió el decorativo. Se halla en el Museo de Prehistoria de Valencia.

Conviene resaltar, desde un principio, que los dos grandes grupos de máximas creaciones artísticas de los iberos no son contemporáneas. La escultura, por lo menos en su representación máxima y, sobre todo, por lo que se refiere a la escultura monumental en piedra, fue realizada durante el primer período, entre el siglo VI y el III a. C. En oposición a ese florecimiento del trabajo de la piedra y del bronce, la pintura cerámica se mantiene dentro de unas líneas de gran sobriedad. Las creaciones espectaculares de la pintura vascular se producirán, por contra, en el segundo período, ya bajo la ocupación romana, durante los siglos III, II y I a. C., cuando la escultura ha entrado en franca decadencia y sólo se mantienen las figuritas de bronce y de terracota en los santuarios, siempre por debajo de la calidad de los primeros tiempos.

No disponemos de elementos para interpretar tal dualidad. Podríamos suponer que el hundimiento de la escultura se relaciona con cierta anemia creadora, producida por las nuevas condiciones de la sociedad. Pero entonces ¿cómo explicar que sea precisamente el período de los siglos II-I el momento en que surge pujante la pintura? El enigma se complica si tenemos en cuenta que es difícil buscar en tales fechas procesos de influencias exteriores, que hubieran despertado afanes imitadores. La gran época de la cerámica pintada mediterránea, que es un fenómeno esencialmente griego, se produjo en los siblos VI, V y IV, con las piezas áticas de figuras rojas y de figuras negras. Desde entrado el siglo IV se puso de moda, tanto en Grecia como en Roma, la cerámica lisa, que imitaba vasijas metálicas.

Cuando los iberos realizan sus producciones en los estilos narrativo y simbólico hacía ya muchas décadas que habían muerto los últimos pintores griegos de vasos; dado el carácter de las cerámi-

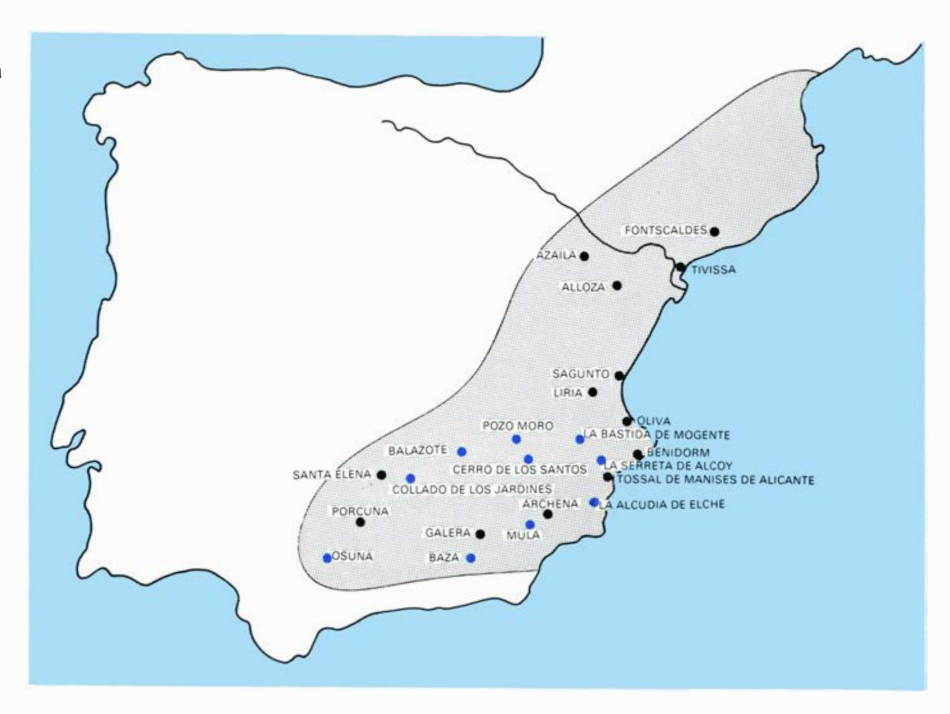
cas, que no son piezas de vida larga, no acertamos a comprender qué hubieran podido imitar. Hemos de suponer, lógicamente, que la aparición de los estilos con figuras nació de una dinámica interna del propio mundo ibérico.

Todo lo anterior expone la necesidad de aclarar un segundo punto: *el estímulo exterior*. Podemos presentar serias dudas sobre el nacimiento por imitación exterior en ciertos casos concretos, como el de la pintura vascular figurada. Es incuestionable, sin embargo, que, visto el arte ibérico en su conjunto, sólo se explica por las corrientes forasteras que, a través de griegos y fenicios, alcanzaron las costas de la península entre los siglos VIII y V. Sin los modelos del Este mediterráneo, el arte ibérico no hubiera nacido ni se hubiera desarrollado según las pautas que acabamos de esbozar.

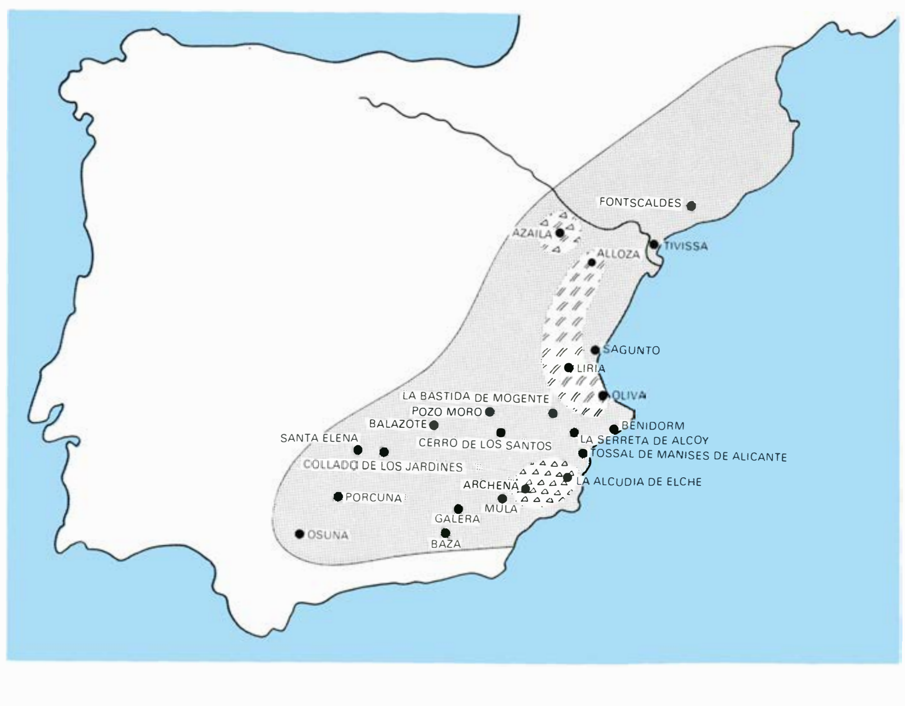
Si el hecho está claro considerando el arte, resulta mucho más comprensible por cuanto no sólo las creaciones artísticas sino otros muchos aspectos de la cultura ibérica resultan hijos de un mismo fenómeno. Por primera vez se habían puesto en contacto los pueblos de la zona que sería la ibérica, con gentes de las altas culturas mediterráneas. Era un contacto entre unas sociedades desarrolladas y otra a nivel de subdesarrollo, para emplear terminología de hoy. Más o menos paralelamente al arte, nacieron en el mismo territorio –o fueron adoptados– otros elementos significativos: desde el hierro como metal de uso normal, hasta la moneda (algo más tarde) o la escritura, y ya antes nos hemos referido al torno de alfarero.

La visión del fenómeno, tal como lo interpretan los estudiosos de hoy, permite comprender también las mismas raíces del iberismo. No se trata de la llegada de un pueblo nuevo, como durante años y años se creyó. Los iberos son un fenómeno de civilización, constituyen la transformación de los habitantes del país, los cuales saliendo de un estadio más primitivo adoptan en unos casos, y reelaboran en otros, conocimientos y elementos que han conseguido asimilar. De esta forma crean una cultura original, muy condicionada, sin embargo, en ciertos aspectos por sus modelos y próxima a ellos.

Los agentes de los contactos con el exterior, en concreto con el Mediterráneo oriental, fueron los fenicios y los griegos. ¿A cuál de estos canales hemos de atribuir el papel predominante? Tanto para otros aspectos como para el propio arte, el problema ha preocupado largamente a los estudiosos, y quizá no valdría la pena de entrar en detalles sino



LA ESCULTURA ibérica puede dividirse en tres grandes grupos: la escultura en piedra, los bronces y las tierras cocidas. A pesar de la comodidad de tal distinción, la mejor clasificación que puede hacerse de esta rama del arte ibérico es como sigue: escultura de los santuarios (con valor de ofrenda o de ex-voto) y escultura funeraria. Podían ser figuras femeninas, como La Dama de Elche y La Dama de Baza, o bien figuras de animales, con frecuencia fantásticos y mitológicos. Los topos coloreados aluden a los santuarios o yacimientos más importantes.





LA PINTURA ibérica ocupa, de hecho, toda el área ibérica. No se trata de un fenómeno local, como ocurría con la escultura. Ello no supone que se trate de un arte uniforme. Podemos distinguir dos estilos principales: el estilo simbólico y el estilo narrativo. El estilo simbólico se circunscribe al territorio que se encuentra a caballo del país valenciano y Murcia. El estilo narrativo se circunscribe al eje Oliva-Liria-Alloza. En Azaila encontramos un estilo personalísimo, que combina figuras animales o humanas con decoraciones barrocas a base de motivos vegetales.



VASIJA hallada en la ciudad ibérica de La Alcudia de Elche. Constituye un ejemplar típico de la pintura de estilo "simbólico", llamado "Elche-Archena". El águila explayada, con un tratamiento casi heráldico, ocupa el frente. El águila, y el lobo, son los más representados en este estilo.

resultara que, desde hace menos de veinte años, la visión ha cambiado de modo muy notable.

Hasta nuestros días, las hipótesis más aceptadas se inclinaban de forma tajante en favor de los griegos. Se partía de la base de que la penetración comercial griega, a partir del siglo VI, había sido muy fuerte, apoyándose no sólo en el comercio marítimo sino a través de factorías o ciudades coloniales establecidas a lo largo de toda la costa ibérica. Aparte de las conocidas, indiscutibles y excavadas en mayor o menor grado en la costa catalana, *Emporion* y *Rhode,* en los textos antiguos existen referencias a otras en el litoral meridional valenciano *(Hemeroscopeion, Alonis, Akra Leuké),* e incluso en la costa andaluza *(Mainake),* en los alrededores de Málaga. Bajo tales supuestos parecía que la penetración griega pudo ser profunda.

Las investigaciones arqueológicas en dichas costas, muy activas en los dos últimos decenios, han venido a dar un giro copernicano al panorama aceptado. Las excavaciones en el litoral malagueño revelan una serie de pequeñas factorías fenicias, a partir del siglo VII y posiblemente incluso del VIII, mientras que los escasos hallazgos de piezas griegas se hallan vinculados a dichos centros, cual si se tratara de uno de tantos elementos de su comercio exterior y no de contactos directos, por lo menos en líneas generales.

Cuando acababa de producirse esta sorpresa, la costa valenciana en donde se buscaban las "ciudades" griegas, arriba mencionadas, revela por el contrario notable densidad de cerámicas fenicias, fechables en el siglo VI, en dos puntos: la desembocadura del Segura (yacimiento de Los Saladares) y la costa de Burriana (yacimiento de Vinarragell), lo que enlaza con otros elementos cerámicos fenicios, menos densos, pero también significativos, en la zona de la desembocadura del Ebro.

Es decir, durante la etapa que precede inmediatamente, y que coincide con las fechas del nacimiento de la civilización y del arte ibéricos, el elemento dominante en las costas fue el fenicio, no el griego. Sólo bastante después se abre el mercado, en forma masiva, a las importaciones griegas. Ello viene muy bien atestiguado por la profusión de cerámicas finas de Atenas, que aparecen a partir de mediados del siglo V y en especial durante el IV. Pero en aquellas fechas las raíces de la sociedad ibérica ya estaban echadas, y si bien tal presión pudo contribuir –y sin duda contribuyó notablemente– a matizar aspectos de su desarrollo, es difícil aceptar que el aporte griego constituyese la base originaria.

El problema deriva hacia campos en los que ahora no podemos entrar, como son las relaciones entre mundo ibérico y Tartessos. Por un proceso de aculturación análogo, pero con primacía en el tiempo, los pueblos de la zona central y oriental de Andalucía crearon la cultura tartésica, que contó con el contacto de la ciudad de *Gadir* (Cádiz), uno de los primeros centros urbanos de occidente.

Dada, pues, la vecindad del área tartésica con la ibérica, y la prioridad temporal de los tartésicos, es difícil rechazar la tesis de que ciertos elementos de transformación que contribuyeron a crear el mundo ibérico pasaron por Tartessos. Para los aspectos artísticos, la cuestión parece secundaria, ya que no sabemos que existiera una escultura o una pintura tartésica comparable, ni de lejos, a las producciones ibéricas.

Datación mediante huellas de fisión

La fisión espontánea de trazas de uranio deja en muchos minerales huellas que informan sobre la edad de éstos. Una de las principales ventajas de esta técnica reside en el amplio período que abarca

J. D. Macdougall

La capacidad de medir la edad real de una antigua formación rocosa, de un hueso o de un artefactó cultural es relativamente nueva. Se apoya en el hecho de que los isótopos radiactivos de muchos elementos comunes se desintegran espontáneamente a tasas fijas. Un ejemplo conocido es un isótopo presente en toda materia viva: el carbono 14. En nuestros días, un nuevo método radiométrico ha empezado a revolucionar las investigaciones cronológicas en disciplinas tan dispares como la cosmología, la geología y la arqueología. Con el nuevo método se mide la fisión espontánea de ciertos elementos pesados, y, en especial, la del isótopo más abundante del uranio, U-238. Contando con una muestra adecuada para el análisis, se puede determinar su edad absoluta dentro de un inmenso período temporal, a saber: desde hace unos cuantos decenios hasta los tiempos remotos en que se formó el sistema solar. Este método recibe el nombre de datación por huellas de fisión.

Las huellas de fisión fueron descubiertas a fines de la década del 50 por dos investigadores del British Atomic Research Establishment, de Harwell: E. C. H. Silk y R. S. Barnes. Expusieron unas muestras de mica, mineral cristalino, a los iones producidos por la fisión de elementos pesados. Una serie de interacciones con los átomos del retículo cristalino del mineral frenaba y, detenía finalmente, los iones; éstos, a su vez, dejaban finas huellas lineales, visibles a grandes aumentos. Barnes y Silk publicaron, en 1959, micrografías electrónicas de algunas de estas huellas en la revista inglesa de física, *Philosophical Magazine,* con lo que se establecía un nuevo campo de investigación.

Pronto se demostró que casi cualquier tipo de ión pesado energético dejará huellas en una amplia gama de sólidos. Luego, un grupo de investigadores, Robert L. Fleischer, P. Buford Price y Robert M. Walker, a la sazón en el Research and Development Center de General Electric en Schenectady, señalaron que la fisión espontánea de las pequeñas cantidades de uranio presentes como "impurezas" en muchas rocas distintas dejaría dichas huellas en los cristales de esas rocas. El uranio 238 se fisiona a una tasa característica y, al hacerlo, las dos mitades (aproximadamente) de su núcleo se repelen mutua y violentamente, dejando una traza característica. Fleischer, Price y Walker sugirieron que el estudio del número de huellas en los cristales de las rocas daría pistas para descifrar la edad absoluta de éstas. La aplicación actual de este tipo de análisis de huellas a una multitud de cuestiones en disciplinas tan dispares como la física de los rayos cósmicos y el campo de la evolución humana ha recaído principalmente sobre los hombros de estos tres pioneros.

Uno de los primeros problemas que fue preciso resolver, antes de que la datación por huellas de fisión se convirtiese en un método práctico, residía en que las huellas resultaban casi invisibles. En los especímenes de mica obtenidos por Silk y Barnes, la región afectada por cada ion incidente era de sólo 100 angstroms a lo ancho –una quincuagésima parte de una longitud de onda luminosa–. Recurriendo a las enormes posibilidades de aumento del microscopio electrónico, necesario para resolver los rasgos ultrafinos de las huellas, llevaría numerosas semanas al revisar apenas un sólo centímetro cuadrado de material en busca de huellas de fisión. Se descubrió luego que la región contigua a la huella de fisión, en donde se ha perturbado el retículo cristalino, es menos resistente al ataque de un solvente que la zona del retículo no perturbada. Por ejemplo, cuando se pone mica en un baño ácido durante un tiempo adecuado, se disuelve la región afectada a lo largo de la huella, creándose un agujero 100 o más veces mayor que la huella original. Este aumento aúpa a las huellas hasta el campo de las mediciones en micrómetros; y así pueden verse fácilmente con microscopios ópticos, a unos aumentos de 500 a 1000 diámetros. De este modo, pueden revisarse con velocidad y precisión, zonas superficiales relativamente extensas.

¿Cómo se forman, en definitiva, las huellas de fisión? Hasta este momento, la respuesta más satisfactoria es la sugerida hace más de diez años por Fleischer, Price y Walker, e incorporada en lo que ellos denominan el modelo de impulso de hiperamplitud de la fisión. Según este modelo, el fragmento de fisión, que se desplaza a gran velocidad y posee una fuerte carga eléctrica, ioniza los átomos a lo largo de su recorrido en el material donde incide, despojándolos de algunos de sus electrones. Si el material es un sólido conductor, como los metales y ciertos minerales, los electrones despojados son reemplazados de inmediato por electrones libres, sin que quede alterado el retículo cristalino.

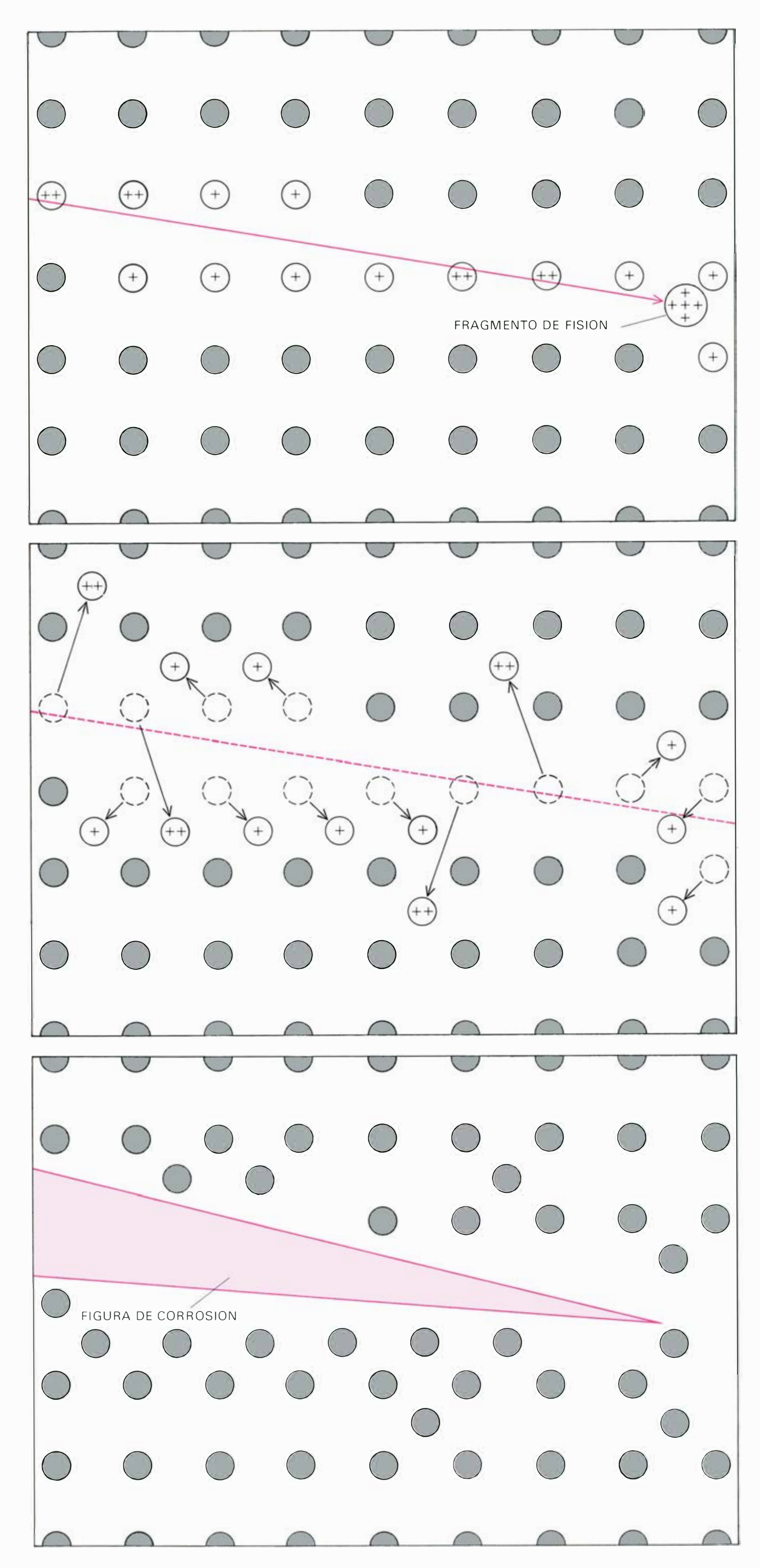
Pero si el material es un sólido aislante, no se substituyen los electrones que han sido arrancados, y los átomos permanecen con carga positiva neta. Su repulsión eléctrica recíproca los aparta entre sí, afectando a la estructura del cristal. Con una excepción significativa, el daño persiste indefinidamente.

Un sólido aislante puede registrar una huella de fisión aun cuando no sea cristalino. Los sólidos amorfos, tales como los vidrios volcánicos, los vidrios artificiales y los plásticos, también se alteran en presencia de la fisión. El proceso de formación de huellas en estas substancias se produce por la rotura de enlaces químicos, y no por la perturbación de un retículo cristalino, pero el resultado final es el mismo: una estrecha región a lo largo del recorrido del fragmento de la fisión se hace menos resistente al ataque químico que el material circulante.

El método básico de datación mediante el análisis de las huellas de una fisión se reduce a contar el número de huellas por unidad de superficie de la muestra. En general, cuanto más huellas se hayan producido, más fisiones han ocurrido y más vieja es la muestra. El método puede parecer algo diferente de otras técnicas radiométricas de datación, tales como el medir la abundancia relativa del potasio radiactivo y de su isótopo descendiente, el argón; del rubidio radiactivo y de su isótopo descendiente, el estroncio. De hecho, los dos tipos de datación son muy análogos: la única diferencia fundamental estri-



HUELLAS DE FISION en un cristal de circón, registradas en una micrografía óptica, cuyo aumento es de 3100 diámetros. La visibilidad de las huellas se ha mejorado mediante un proceso de mordentado que aumenta el espesor de cada huella, desde unos 100 angstroms hasta uno o más micrometros. Cada huella registra la fisión espontánea de un átomo de U-238. En el circón se hallan hasta 1000 p.p.m. de U-238.

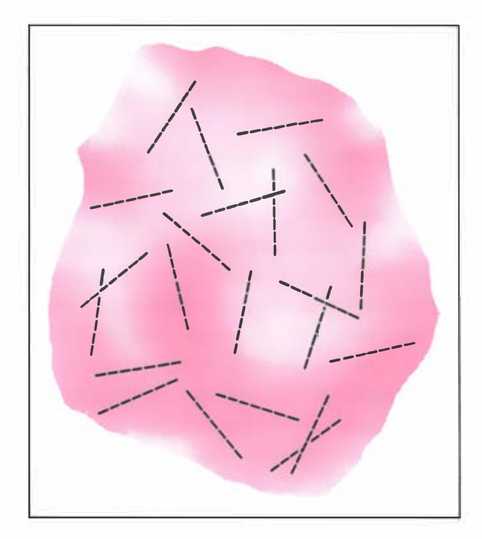
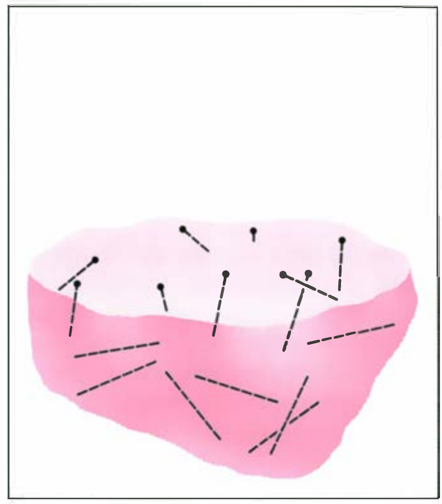
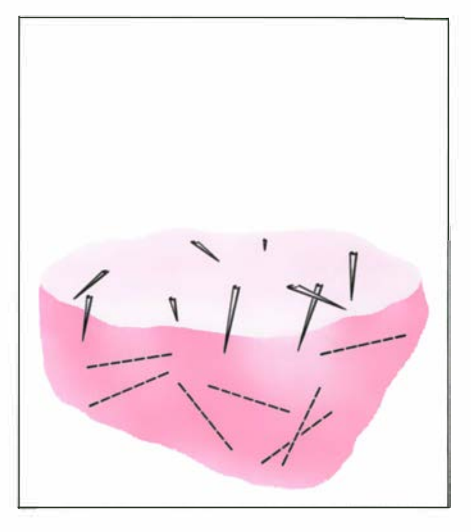


ba en que, en una técnica, se mide un producto de desintegración y, en la otra, se mide un efecto de la desintegración. Pero la fisión espontánea es un suceso mucho más raro que otros tipos de desintegración radiactiva. Por ejemplo, cuando se cuentan las huellas producidas por la fisión del uranio, pueden observarse hasta centenares, siendo cada una el registro de la fisión de un átomo de uranio 238. Compárese esto con la medición, sumamente sensitiva, de potasio-argón, que precisa alrededor de una diezmillonésima de centímetro cúbico de argón 40. La muestra de argón representa la desintegración espontánea, no ya de unos centenares, sino de unos tres billones de átomos. El número mucho menor de desintegraciones que sirve de base para el análisis de huellas de fisión explica una de las grandes ventajas del método: unas muestras muy pequeñas pueden proporcionar datos valiosos. En circunstancias favorables puede determinarse la edad de una probeta con el análisis de un solo cristal microscópico o de un fragmento de vidrio volcánico.

La concentración media de uranio en las rocas de la corteza terrestre no pasa de unas pocas partes por millón. Incluso a esta escasa concentración, al cabo de más o menos un millón de años, se producen fisiones espontáneas en número suficiente como para dejar una cantidad medible de huellas de fisión en algunos cristales. Además, la mayoría de las rocas cristalinas de la corteza terrestre tienen más de un millón de años de edad, de modo que sus cristales han acumulado un gran número de huellas aun cuando contengan apenas unas trazas de uranio.

El uranio 238 es el único producto significativo de huellas en las rocas terrestres y en los vidrios naturales y artificia-

LA FORMACIÓN DE HUELLAS se muestra esquemáticamente, según el modelo propuesto por Robert L. Fleischer, P. Buford Price y Robert M. Walker. Uno de los dos fragmentos ionizados positivamente *(arriba)*, producidos por la fisión de un átomo de U-238, pasa a través de un retículo cristalino idealizado; conforme lo hace, libera electrones de los átomos que encuentra en su camino, ionizando así a los átomos. Luego *(centro)*, los átomos ionizados del retículo se desplazan, alterando la estructura del mismo. Cuando el cristal se expone a un solvente *(abajo)*, la fracción alterada del retículo es más susceptible al ácido que la porción no alterada. Sólo los minerales aislantes registran las huellas de la fisión; los electrones libres de los materiales no aislantes devuelven la neutralidad eléctrica a los átomos momentáneamente ionizados, antes de que pueda llegarse a la alteración del retículo cristalino.

CONTAR LAS HUELLAS DE FISION requiere la preparación del espécimen *(izquierda)*, **que contiene las huellas invisibles a los aumentos del microscopio óptico mediante el esmerilado y el pulimento** *(centro)*, **poniendo así al descubierto cualquier huella que corte el plano del pulimento. La probeta se sumerge luego en el baño de mordiente. El proceso provoca huecos a lo largo de cada huella expuesta** *(derecha)*.

les. Existen otros elementos cuya fisión es espontánea, pero son escasos y su velocidad de fisión es lenta. Por ejemplo, se estima que las huellas producidas por la fisión espontánea de otro isótopo del uranio, el U-235, y del torio 232 representan en conjunto menos del 5 por mil del número total de huellas observadas en la gran mayoría de las muestras. Pero, según veremos, el hecho de que en los vidrios y cristales se hallen presentes cantidades incluso diminutas de U-235 resulta de gran ayuda para el geocronólogo.

A lo largo de los períodos geológicos, el uranio 238 se transforma de dos maneras diferentes. La más común, y con mucho, es la desintegración por emisión de una partícula alfa. Esta emisión transforma el átomo de uranio en un átomo de torio 234, isótopo radiactivo que se desintegra, a su vez, por la emisión de otra partícula alfa. No obstante, las partículas alfa no poseen la masa y energía suficientes como para dejar huellas en los minerales comunes.

Una de cada dos millones de transformaciones del uranio 238, aproximadamente, se efectúa por fisión y no por desintegración alfa. El proceso divide al núcleo de uranio en dos fragmentos pesados y dotados de energía, de masa sólo ligeramente diferente; al mismo tiempo se emiten varios neutrones. Los dos pesados fragmentos se disparan en sentidos exactamente opuestos. Por lo tanto, el daño que ocasionan al retículo cristalino tiene la forma de una sola huella recta, la mitad de cuya longitud, aproximadamente, es creada por cada fragmento. La longitud total de la huella varía según el mineral donde se produzca. En general mide de 10 a 20 micrómetros.

En el procedimiento usual para estudiar las huellas se empieza por empotrar la probeta en una matriz hecha, por ejemplo, de resina epóxica, para mayor comodidad de manipulación. La cara expuesta del cristal se esmerila plana y se pule cuidadosamente antes de sumergir la probeta en el baño de mordiente. Después del mordentado, se observa el cristal al microscopio. Obviamente, el mordentado revela sólo las huellas que cortan la superficie pulida.

Puesto que se conoce la tasa de desintegración del uranio 238 mediante fisión espontánea, basta con dos mediciones para calcular la edad de una probeta fundándose en las huellas visibles después del mordentado: cálculo del número de huellas por centímetro cuadrado de superficie y análisis del contenido de U-238 en la probeta. Pero como las densidades de huellas se expresan en unidades de superficie y el contenido de uranio en unidades de volumen, existe una ambigüedad geométrica que da pie a la introducción de grandes errores. Existe un ingenioso método para determinar el contenido de uranio en la probeta que elude el problema. En él se aprovecha el que una muestra con uranio pueda contener no sólo uranio 238, sino también una fracción pequeña, y constante, de U-235.

A los átomos de U-235 se les puede inducir a fisionarse exponiendo la probeta o neutrones lentos en un reactor nuclear. La exposición añade nuevas huellas de fisión a las espontáneas. La densidad de las nuevas huellas es proporcional no sólo a la cantidad total de U-235 presente en la probeta, sino también a dos factores sometidos al control del investigador: la probabilidad de la reacción de fisión inducida y el número de neutrones que hayan pasado por unidad de superficie de la muestra en el reactor. Al ser constante la proporción de ambos isótopos del uranio en la naturaleza, el investigador puede calcular la concentración de uranio presente en la probeta comparando simplemente el número de huellas espontáneas con el de huellas inducidas. Los dos recuentos de huellas pueden efectuarse en una misma muestra o bien, si se prefiere, puede dividirse la muestra. Además, si se expone la muestra al calor, se borran las huellas de fisión por recocido, de manera que la muestra puede recocerse después de efectuar el recuento de huellas espontáneas. Las únicas huellas que quedarán presentes serán entonces las de los fragmentos de U-235 formados por el bombardeo de neutrones ulterior.

Cuanto más vieja sea una probeta, tanto menos importa que su contenido de uranio sea grande: habrá suficientes huellas de fisión como para un recuento estadísticamente fiable. A la inversa, cuando se trata de precisar por este método la datación de una muestra cuya edad esté muy por debajo del millón de años, la fecha puede precisarse solamente si la concentración de uranio es relativamente elevada. Por ejemplo, el mineral circón, constituyente común de muchas rocas, puede contener algunos centenares de partes por millón de uranio. Los cristales de circón con una concentración de uranio de 100 partes por millón pueden establecer la edad abso-

luta de una roca de apenas 3000 años. Como norma aproximada, si el contenido de uranio de una muestra de cristal o vidrio es de una parte por millón, el investigador puede medir edades absolutas que lleguen apenas a los 300.000 años. Un cambio de un orden de magnitud en cualquier dirección respecto del contenido de uranio trae consigo un cambio inversamente proporcional del orden de magnitud en la más reciente edad mensurable. Ciertas clases de vidrio artificial contienen hasta 100 partes por millón de uranio, y con ellos se pueden determinar edades absolutas recentísimas, de 30 años por ejemplo. En el extremo opuesto, las micas con concentraciones de uranio bajísimas, del orden de una parte por millón, pueden usarse para medir edades absolutas iniciadas a fines de la era palezoica (hace 300 millones de años).

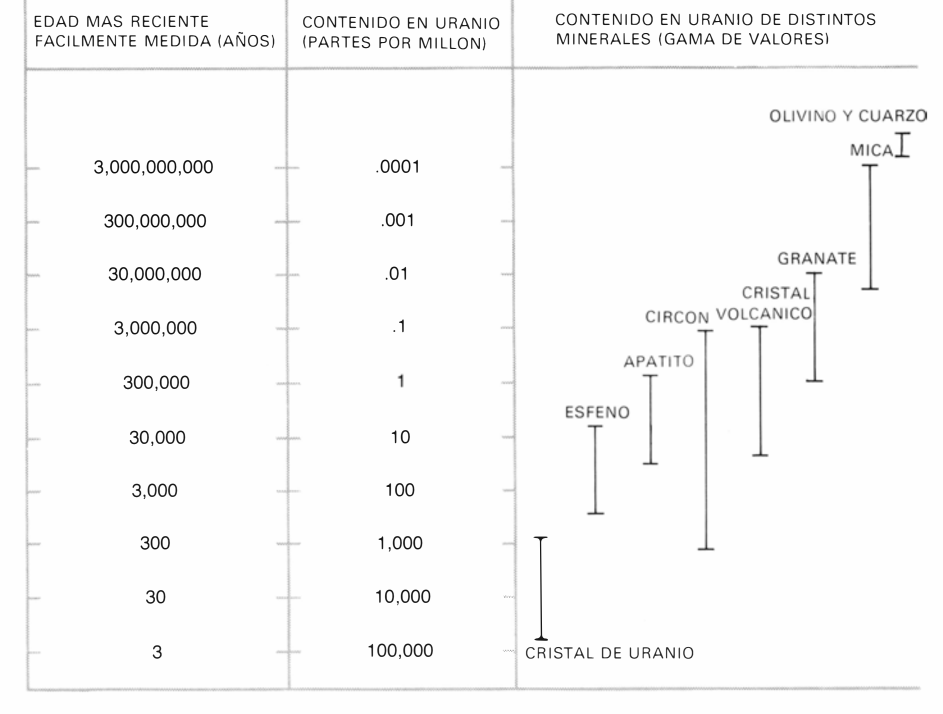
Todo esto hará parecer que las dataciones por las huellas de fisión son notablemente precisas, y en su mayoría lo son. Sin embargo, conviene hacer ciertas observaciones preventivas. Para calcular una edad por este método se parte de cuatro hipótesis de trabajo. La más segura de las cuatro, en la que se basan todos los métodos de datación radiométrica, consiste en que la tasa de desintegración del isótopo precursor (que en el caso de la datación por huellas de fisión es el uranio 238) ha sido constante a lo largo del tiempo. Tanto las mediciones en laboratorio como las comparaciones geológicas indican que esta suposición es válida. Las otras tres son más inciertas.

Una de ellas es que las huellas de fisión se producen con un rendimiento del 100 por ciento. Los experimentos señalan que así es, efectivamente. Cuando se encuentran diferencias respecto del número previsto de huellas, se deben, al parecer, a problemas que afectan a la técnica de detección de huellas. Además, la posibilidad de que el error proceda de esta suposición se anula cuando se examinan fisiones tanto inducidas como espontáneas. Aunque la técnica de detección tenga un rendimiento del 10 por ciento, mientras se aplique esta eficiencia a la detección de huellas de fisiones tanto espontáneas como inducidas, la edad calculada seguirá siendo correcta.

La tercera hipótesis afirma que las huellas de la fisión se conservan con un 100 por ciento de rendimiento. Como siempre existe la posibilidad de que las huellas hayan sido borradas por un recocido natural o artificial, es ésta una suposición que no siempre puede justificarse. No obstante, puede verificarse independientemente en los casos que puedan emplearse otros métodos de datación radiométrica. Tales comprobaciones independientes muestran que las discrepancias de las huellas de fisión se agolpan sistemáticamente hacia el lado más reciente de la escala de edades. Esto es particularmente notorio cuando se examinan muestras muy antiguas. Exceptuando las ligeras variaciones aleatorias que suelen estar comprendidas en el campo de errores experimentales de medición, cuando se demuestra que las edades calculadas por las huellas de fisión son erróneas, casi nunca son mayores que las edades obtenidas por otras técnicas de datación absoluta. No es difícil saber el por qué: en la mayoría de los minerales usados para la datación mediante huellas de fisión las temperaturas que bastan para borrar las huellas por recocido están muy por debajo de las que empiezan a desvirtuar otros métodos de datación radiométrica.

Además, en algunos casos, las edades halladas por huellas de fisión y que han sido desvirtuadas por un recocido parcial pueden reconocerse y aun introducirse como tolerancias. A modo de ejemplo, si un determinado mineral ha sido sometido al calor en cierto momento de su historia, pero sin que ese calor haya recocido enteramente las huellas que ha registrado sobre sí, la medición de las longitudes de las huellas mostrará una distribución bimodal: un grupo consta de huellas acortadas por recocido parcial y otro consta de huellas de longitud normal procedentes de fisiones espontáneas acaecidas después del episodio de calentamiento. Con experimentos de calibración en el laboratorio se puede corregir la cifra global de densidad de huellas respecto del efecto del acortamiento térmico y obtener una cifra reequilibrada correspondiente a la densidad de huellas de fisión espontánea.

La cuarta hipótesis de trabajo presupone que la concentración de uranio en cualquier probeta ha permanecido constante a lo largo de su duración. Esta suposición suele ser válida, pero puede haber excepciones. La conjugación de elevadas temperaturas e infiltración de agua subterránea puede lixiviar cierta proporción del uranio contenido en los cristales de roca. La movilidad del uranio es tal que, a medida que una parte de una formación rocosa se empobrece, puede otra llegar a enriquecerse anormalmente. Cambios como éstos pueden presentarse a temperaturas relativamente bajas. Andrew J. W. Gleadow y John F. Lovering, de la Universidad de Melbourne, han comparado gra-



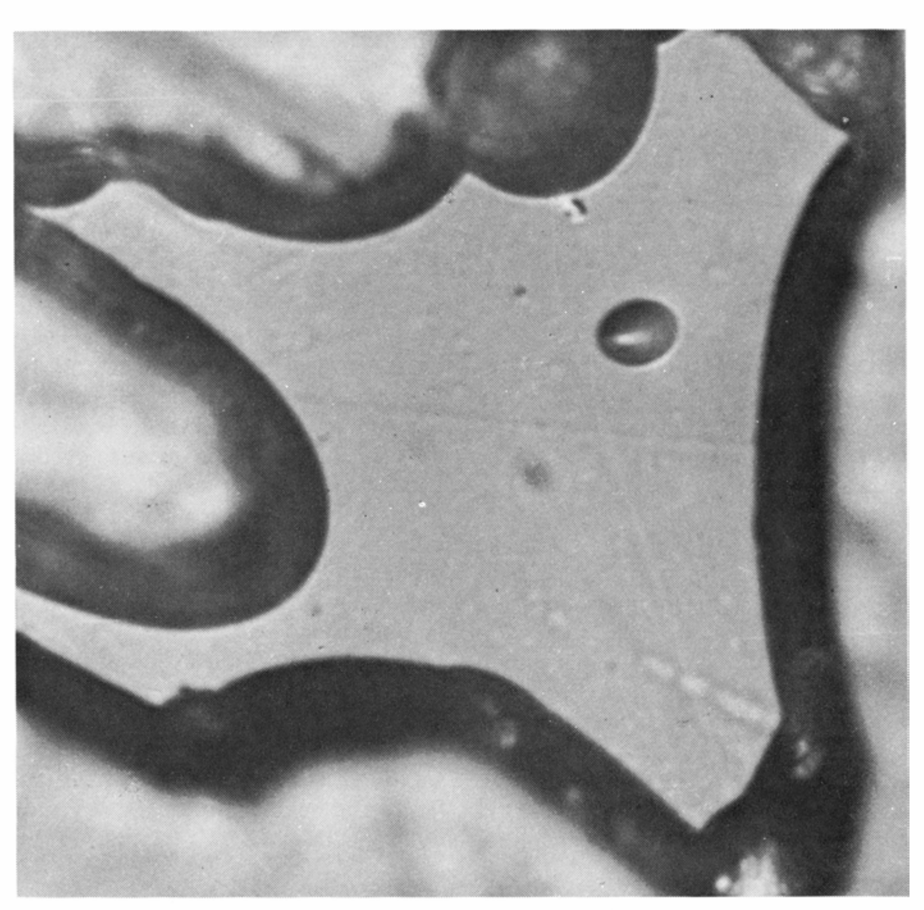
CONTENIDO DE URANIO en siete sólidos cristalinos y en dos sólidos amorfos. Los vidrios artificiales, coloreados al añadirles óxido de uranio, son los materiales más ricos en uranio: desde 0,1 hasta un 8 por ciento, inclusive. Su fecha de fabricación puede calcularse con una precisión de tres años. Dos cristales, el olivino y el cuarzo, pueden contener uranio en proporciones, mínimas, de 0,1 partes por mil millones. Es difícil determinar la edad de estas probetas que cristalizaron quizás hace tres mil millones de años.

nos de apatito, una mineral muy común, muy meteorizados, con otros no sometidos a la intemperie y empotrados todavía en la roca original. Los granos meteorizados contenían aproximadamente 25 por ciento menos de uranio que los de la roca originaria y rendían unas dataciones anómalas.

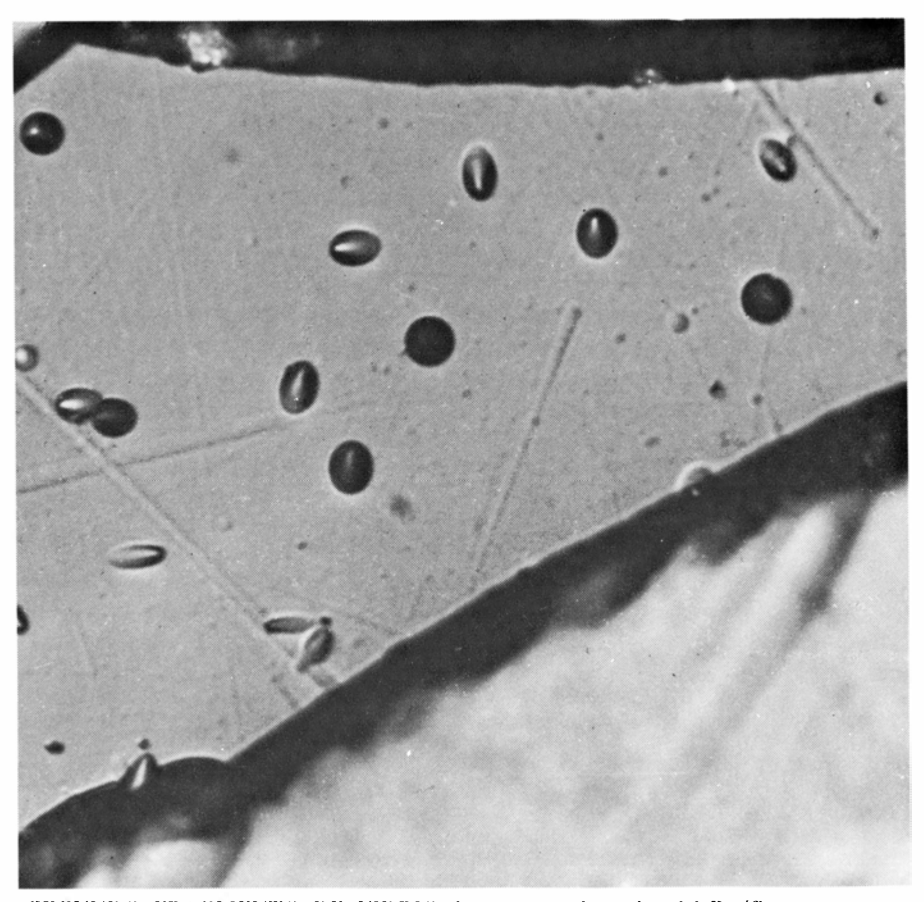
La mejor manera de indicar tanto la utilidad como las futuras posibilidades de la datación mediante las huellas de la fisión es citar algunos ejemplos de su empleo. Mencionaré sólo brevemente que los geólogos han encontrado a este método de datación especialmente atrayente cuando es preciso establecer un encuadre cronológico para resolver un determinado problema de campo. Esto se debe a que el sistema es simple, y cuando se precisa un gran número de determinaciones, el coste por muestra es bajo. Las tres clases principales de rocas –sedimentarias, metamórficas e ígneas– son susceptibles al análisis de huellas de la fisión. Entre las rocas ígneas de los minerales ricos en uranio que suelen usarse hay dos que he mencionado, el circón, y el apatito. Un tercero de estos minerales es el esfeno, un silicato de calcio y titanio. También se ha empleado con éxito diversas variedades de mica para datar rocas ígneas y rocas metamórficas.

El uso de la datación por huellas de fisión en el terreno de la prehistoria se ha limitado, por lo general, a situaciones que escapan al campo de mediciones útiles del carbono 14. Como el período de semidesintegración radiactiva del carbono 14 es de sólo 5700 años, su uso para la datación se va haciendo progresivamente menos de fiar cuando la edad de la muestra sobrepasa los 30.000 años. Un caso demostrativo es el descubrimiento, en 1959, de restos fósiles de homínido en la quebrada Olduvai, en Tanzania, por Louis y Mary Leakey. El homínido, al que los Leakey denominaron Zinjanthropus, era entonces uno de los más antiguos que se conocían: los fósiles concomitantes con el hallazgo sugerían que su edad podía ser de un millón de años, edad que sobrepasaba ampliamente el campo de aplicación de cualquier medición mediante el carbono 14.

Pero se da el caso que la formación geológica de la quebrada Olduvai está constituida por una serie de rocas metamórficas, que incluye numerosas capas de toba y ceniza volcánicas. Algunos minerales volcánicos son adecuados para el análisis de potasio-argón; y así, Jack F. Evernden y Garniss H. Curtis, de la Universidad de Berkeley, California, anali-



VIDRIO VOLCANICO, hallado en una capa de ceniza en un testigo de sedimentos abisales del Pacífico, que muestra la cicatriz de una huella de fisión espontánea (× 1300 diámetros).



SEGUNDO FRAGMENTO DE VIDRIO de una capa de ceniza del Pacífico, que muestra las cicatrices de huellas de fisión; estas huellas de fisión fueron inducidas exponiendo la probeta de un reactor nuclear y bombardeándola seguidamente mediante neutrones lentos.

zaron unas muestras tomadas de los estratos volcánicos relacionados en general con el nivel de la quebrada en el cual fueron hallados los restos del homínido. Obtuvieron unas dataciones mediante potasio-argón que sugerían que la edad efectiva del Zinjanthropus era casi el doble de la que habían indicado los fósiles concomitantes: 1.750.000 años aproximadamente.

El resultado obtenido por Evernden y Curtis podría haberse considerado discutible (en especial por cuanto las muestras minerales dieron una amplia gama de fechas a partir del método potasio-argón) si la interpretación que hicieron no se hubiese visto confirmada independientemente a partir del análisis de huellas de fisión. Fleischer, Price y Walker emprendieron dicho análisis trabajando con una probeta de piedra pómez, el vidrio volcánico poroso, procedente de un estrato de Olduvai relacionado con el anterior. Era difícil trabajar con la piedra pómez: las superficies del vidrio mordentado eran pequeñas e irregulares y la solución ácida disolvía de hecho fragmentos de la muestra. No obstante, los investigadores determinaron mediante las huellas de fisión una fecha para la piedra pómez: $2,0 \pm 0,3$ millones de años, cifra que concuerda estrechamente con la datación mediante potasio-argón, a saber, 1.750.000 años.

En el otro extremo del espectro antropológico, se pueden estudiar ciertos vidrios artificiales a los que se ha añadido uranio en concentraciones que llegan hasta del 1 por ciento para su coloración. Los vidrios de esta especie, que han sido un producto de norma en Bohemia desde mediados del siglo pasado, pueden datarse mediante el método de huellas de fisión. Algunos estudiosos del arte oriental sostienen que siglos antes se producían en China vidrios de uranio semejante. Pero Günther A. Wagner, de la Universidad de Heidelberg, ha observado que cuando se sometió al análisis de huellas de fisión un anillo chino hecho de vidrio uránico, presuntamente producido en la época de la dinastía Ch'ing en el siglo XVIII, resultó ser una falsificación del presente siglo, de menos de 70 años de edad.

RAYO COSMICO

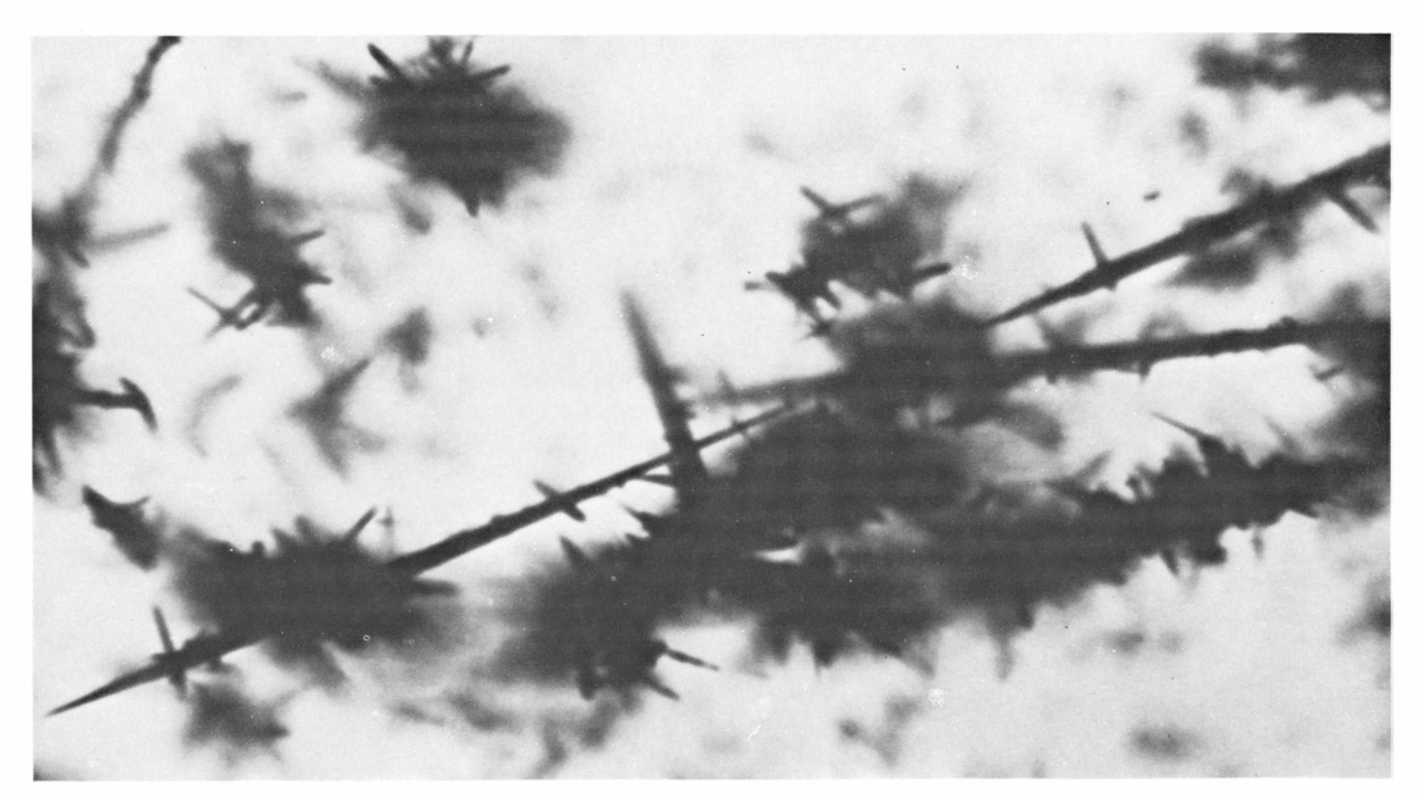
RAYO COSMICO

CRISTALES DE OLIVINO dispersos por la matriz arcillosa de meteoritos clasificados como condritas carbonáceas que, a menudo, carecen por completo de huellas de rayos cósmicos *(izquierda)*, porque la matriz los resguarda. Las superficies cristalinas suelen mostrar huellas de fisión *(centro)* ocasionadas por la fisión espontánea de átomos de uranio y plutonio contenidos en la matriz. Como pudieron formarse sólo después de haberse juntado la arcilla y el olivino para formar el meteorito, la "edad de contacto" mostrada por los cristales mide la del meteorito. Algunas condritas son mucho más recientes que lo previsto.

Los cristales de circón son componentes naturales en algunas de las arcillas usadas para hacer cerámica; todos los que estén presentes en una pieza de cerámica quedan "reglados a cero" al hornearse el cacharro. La elevada temperatura del horno borra todas las huellas de fisión existentes. A causa del recocido, las huellas proporcionan una indicación precisa del momento en que la cerámica haya sido horneada. Unos investigadores han podido asignar fechas de fabricación, que variaban desde 300 a. C. hasta hace 700 años, a varios objetos de cerámica que contenían cristales de circón. La datación de cerámica hecha recientemente es, sin embargo, un trabajo tedioso: es preciso revisar un número muy grande de cristales diminutos a fin de obtener un cálculo preciso de la densidad de huellas.

El mineral calcita, la forma cristalina hexagonal del carbonato de calcio, ha sido encontrado creciendo en las cavidades de las médulas de antiguos huesos, y entre ellos los huesos fósiles de homínidos del género *Australopithecus* desenterrados en las cuevas de piedra caliza de Sudáfrica. Algunos de los cristales de calcita contienen uranio en concentraciones que llegan a varias partes por millón. Price y el autor estaban trabajando juntos en su laboratorio de la Universidad de Berkeley, California, cuando se enteraron de ello, hace de esto algunos años. Decidieron ver si las huellas de fisión en los cristales podrían proporcionar fechas mínimas para los huesos fósiles, puesto que los cristales no podrían haberse formado en las cavidades de las médulas de los australopitecos sino hasta bastante después de su muerte.

Las densidades de las huellas de fisiones espontáneas resultaron ser mucho más bajas de lo esperado; ello sugería que los huesos fósiles no eran, en absoluto, tan antiguos como lo indicaban otras pruebas. Pero cuando realizaron experimentos de recocido con cristales de calcita en el laboratorio descubrieron que las huellas de la fisión en la calcita pueden borrarse sin dificultad. Al parecer, la exposición a la temperatura ambiente durante un período de un millón de años o algo así resulta suficiente para recocer las huellas de fisión existentes en la calcita y, de este modo, dan pie a unas determinaciones de edad anómalamente breves. Llegaron a la conclusión de que la calcita no ha de constituir un mineral especialmente útil para la datación mediante huellas de fisión a menos que los cristales se hayan formado en los últimos milenios.



LAS HUELLAS FORMADAS POR RAYOS COSMICOS en un cristal de olivino de un meteorito se han ampliado en el mordentado, y han sido tratadas con baño de plata para potenciar el contraste óptico. Las numerosas huellas cortas que se cortan marcan las rutas de los núcleos de los átomos de hierro; las huellas largas claramente apreciadas en la ilustración,fueron causadas por elementos todavía más pesados.

Para volver a los usos menos comunes de la datación por medio de las huellas de fisión en geología, las diferencias entre las características del recocido en diversos minerales constituye un medio útil de determinar la historia geológica de tales "acontecimientos térmicos", tales como la intrusión de la roca ígnea joven en una formación ígnea más antigua. Ejemplo de esto es un estudio reciente de L. C. Calk y C. W. Naeser, del U. S. Geological Survey, quienes recogieron un conjunto de muestras de cristales de apatito y esfeno a intervalos poco espaciados a lo largo de una transversal que se alejaba de la línea de contacto entre dos formaciones de rocas ígneas en el Parque Nacional Yosemite (EE. UU.): un granito denominado Cathedral Peak y una intrusión basáltica mucho más reciente. El apatito es bastante estable: para que en ella se borren por recocido unas huellas de fisión tendría que estar expuesta a una temperatura de 130 grados Celsius durante un millón de años. El esfeno es más estable todavía: para que se borrasen en un cristal de esfeno las huellas de fisión se precisaría exponerlo durante un millón de años a unos 400 grados centígrados.

Calk y Naeser encontraron que, cerca de la zona de contacto, los cristales de apatito y los de esfeno del granito más antiguo habían sido recocidos completamente en algún momento del pasado. Los cristales mostraban ahora edades –según la técnica de huellas de fisión– idénticas a las del basalto intrusivo, a saber, unos nueve millones de años. Conforme aumentaba la distancia respecto de la zona de contacto, aumentaba la diferencia entre las edades. A los 10 metros de la intrusión, los cristales de esfeno mostraban edades iguales a la edad conocida para el granito Cathedral Peak: 80 millones de años. Los cristales de apatito, más susceptibles al recocido a menores temperaturas, mostraban ciertos efectos de borrado incluso a 1000 metros de la zona de contacto. Con los datos extraídos de su perfil de muestreo, estos dos investigadores pudieron reconstruir el registro de temperaturas de este fenómeno de calentamiento acaecido hace nueve millones de años.

Se han realizado relativamente pocos estudios como el antedicho. No obstante, es evidente que la geotermometría fundada en el análisis del recocido de huellas de fisión hará posible descifrar la historia térmica de regiones enteras, y en especial de zonas que hayan sido afectadas por varios episodios de recalentamiento. El hecho de que la sensibilidad a los cambios de temperatura varíe entre diversos cristales durante episodios tanto de calentamiento como de enfriamiento, convierte el análisis del recocido de huellas de fisión en una poderosa herramienta geológica.

Los métodos de datación por huellas de fisión son también aplicables a la geología marina. En el océano profundo, lejos de la zona en donde la escorrentía de los continentes afecta a las condiciones abisales, los sedimentos se acumulan en el fondo del océano muy lentamente, incluso a razón de unos milímetros por milenio. Nuestro conocimiento de la velocidad acumulada ha sido obtenido principalmente mediante dos técnicas radiométricas de datación. Una de ellas es la del carbono 14 que, según hemos explicado, es limitada por el breve período de semidesintegración de este isótopo. La otra es la del torio 230, de más amplio empleo porque tiene una vida media de 75.000 años para el Th-230. Pero aun así, esto significa que las muestras de más de 300.000 años de antigüedad han perdido casi toda su concentración original del isótopo radiactivo y ya no pueden proporcionar determinaciones cronológicas útiles. Dada la lentitud típica de la acumulación del sistema en el fondo oceánico, ya el primer metro de un testigo del fondo puede abarcar 300.000 años o más. Incluso los sacamuestras rudimentarios de la década del 50 extraían secuencias sedimentarias de más de un metro de longitud y actualmente el Deep Sea Drilling Project nor-

teamericano (proyecto de sondeos en mar profundo) recupera de modo rutinario testigos de centenares de metros de longitud.

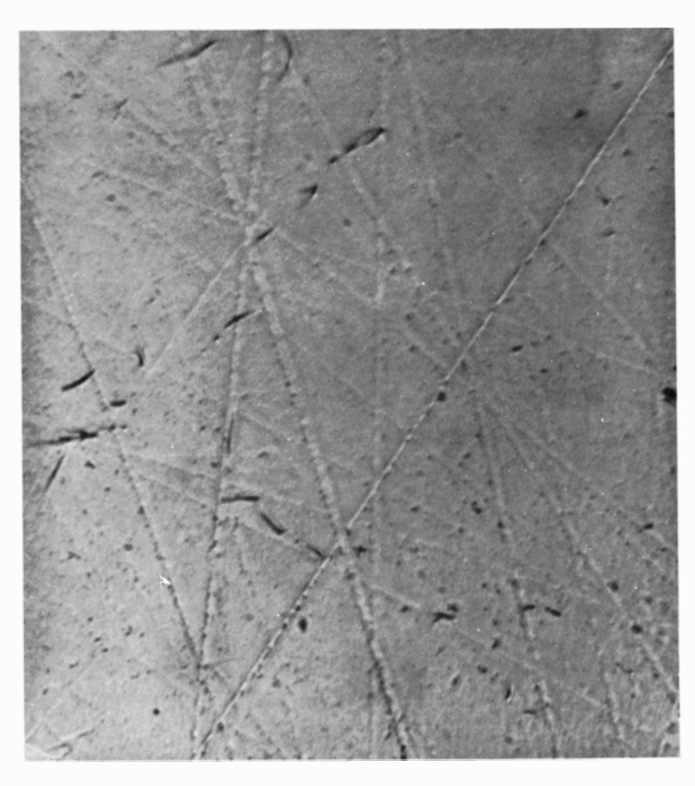
En ciertas circunstancias, las técnicas de huellas de fisión pueden proporcionar unas dataciones para dichos testigos. Sin embargo, la naturaleza de los materiales que componen los sedimentos abisales complican la tarea. Aparte del exoesqueleto de varios organismos marinos muertos, los constituyentes principales del sedimento son partículas de arcillas de grano finísimo, por lo general silicatos de aluminio, minerales que no son muy adecuados para la datación mediante huellas de fisión. Afortunadamente, otra clase de materiales, el desecho de erupciones volcánicas, arrastrado por los vientos, es un componente bastante común de dichos sedimentos; incluso las muestras extraídas lejos de tierra suelen contener capas discretas de ceniza: depósitos que incluyen fragmentos minerales y vidrio volcánico de grano relativamente grueso, que fueron lanzados a gran altura en la atmósfera y arrastrados a gran distancia sobre el mar por los vientos.

El desecho volcánico no es el único material de origen continental que es posible hallar en testigos de sedimentos abisales. Satisface en cambio un criterio que no cumple los minerales precedentes de la escorrentía continental. La edad de estos últimos es obviamente la de las rocas de las cuales fueron desgajados por agentes meteorológicos. Estas rocas pueden ser, a su vez, millones o cientos de millones de años más antiguas que el estrato de sedimento que contiene sus fragmentos erosionados. Por el contrario, el intervalo que separa una explosión volcánica del momento en que el desecho eyectado se hunde hasta el fondo oceánico es insignificante en la escala de tiempos geológicos.

Los productos de una explosión volcánica suelen ser ricos en uranio. Además, algunos componentes de una capa de ceniza volcánica del sedimento abisal son apropiados para un análisis radiométrico mediante el método potasio-argón, lo que permite determinar la edad de dicho estrato mediante dos técnicas independientes. En mi laboratorio, en Scripps Institution of Oceanography, hemos usado los diminutos trazos de vidrio de testigos de sedimento abisal (trozos que, de hecho, eran las paredes de burbujas formadas en lava derretida durante una erupción volcánica) para obtener mediante huellas de fisión unas fechas que concuerdan estrechamente con los resultados mediante potasio-argón procedentes del mismo horizonte de ceniza y, también, con el encuadre cronológico proporcionado por el magnetismo de los propios sedimentos (que registra las inversiones periódicas del campo magnético global de la tierra). Otros investigadores han realizado con éxito parecidos análisis con cenizas componentes de sedimentos volcánicos marinos que los procesos geológicos han elevado sobre el nivel del mar.

Aunque algunos estratos volcánicos existentes en los sedimentos abisales se extienden por miles de kilómetros, las capas de ceniza son más comunes en regiones cercanas a zonas de vulcanismo activo, tales como el Caribe y el Pacífico Occidental. Su escasez (o total ausencia) en muchas zonas centrooceánicas indica que el análisis mediante huellas de fisión tiene límites, en cuanto a ampliar el campo de las dataciones absolutas, tratándose de sedimentos oceánicos profundos. También vale esto en lo concerniente a las edades de las formaciones rocosas de los fondos marinos. La técnica resultó satisfactoria para datar rocas de las montañas marinas, esos volcanes de cima plana que se elevan desde el fondo hasta cerca de la superficie, en especial en el Pacífico Norte. Para los basaltos que constituyen la mayor parte del suelo rocoso del océano, sin embargo, no se ha encontrado ningún método radiométrico de datación que sea totalmente fiable. La técnica de huellas de fisión se halla obstruida en dos aspectos. Primero, los basaltos contienen poquísimo uranio y, segundo, pocos de





EL RECOCIDO POR CALOR determina que las huellas de fisión desaparezcan. Una sección mordentada de un cristal de apatito *(izquierda)* **muestra muchas huellas de fisión. Tras el recocido, otra sección del cristal** *(derecha)* **aparece casi libre de huellas una vez mordentada.**

ellos incluyen alguno de los minerales necesarios para este análisis.

La fisión espontánea del uranio 238 es la única fuente significativa de huellas de fisión en nuestro planeta. Para la datación de materiales extraterrestres entran en acción otras fuentes de huellas de fisión, entre las cuales se cuenta un elemento que ya no está presente en la tierra en su forma natural. La existencia de estas otras fuentes de huellas de fisión hace posible datar con sorprendente precisión acontecimientos que sucedieron durante las primeras etapas de la historia del sistema solar.

Los núcleos atómicos conocidos como rayos cósmicos primarios no llegan nunca hasta la superficie de la tierra, ya sea porque los desvía el campo magnético terrestre, o porque los absorbe la atmósfera, o por ambos motivos. Sin embargo, los núcleos, y en especial los más pesados son capaces de producir huellas en materiales no terrestres, huellas que son casi idénticas a las producidas por fisión. Los investigadores terrestres cuentan ahora con dos materiales de esta especie: los meteoritos y las muestras traídas de la luna. Las huellas dejadas por rayos cósmicos en ambas clases de muestra pueden constituir un problema cuando se trata de determinar la edad absoluta de la muestra mediante datación por huellas de fisión. Pero si el analista elige minerales con un contenido de uranio mayor que el promedio y es asimismo selectivo en su elección del material de muestra, puede vencerse la dificultad. Por ejemplo, usando sólo muestras interiores, situadas al menos a 10 centímetros bajo la superficie de una probeta, el analista hallará que esta parte está relativamente libre de huellas de rayos cósmicos, porque el material circundante ha absorbido la mayoría de las partículas que producen huellas.

Cuando se analiza una muestra meteorítica de esta especie, no es insólito hallar que su edad absoluta, cuando se la calcula por el mismo método usado para minerales terrestres, resulta ser mayor que los 4600 millones de años que figuran la edad calculada del sistema solar. Aquí entra en acción el elemento que ya no se halla en la tierra en su forma natural. Se trata del plutonio. Un isótopo del plutonio, el Pu-244, se fisiona espontáneamente, y en muestras antiquísimas de material extraterrestre el isótopo fue otrora lo bastante abundante como para producir un considerable número de huellas de fisión. Incluso las rocas terrestres más antiguas que se conocen resultan ser demasiado modernas como para haber contenido una cantidad apreciable de plutonio en el momento de su formación, de manera que en muestras terrestres no se encuentran huellas de Pu-244.

Al igual que el uranio, el plutonio del sistema solar fue fabricado originalmente en otra parte de nuestra galaxia por la explosión de estrellas supernovas. Así pues, estuvo presente en la mezcla de materiales que formó el Sol y los planetas. Mientras el uranio 238 tiene un período de semidesintegración de 4500 millones de años, el del plutonio 244 es de 82 millones de años. La consecuencia de esto es que el isótopo de plutonio ya no está presente en cantidades medibles en ningún material del sistema solar. No obstante, en la mayoría de los meteoritos y en algunos minerales lunares que aún conservan huellas de fisión que se han acumulado durante más de cuatro mil millones de años, un número significativo de las huellas fueron producidas por la fisión espontánea del plutonio 244.

Suponiendo, y ello es razonable, que la proporción relativa de los isótopos de uranio y plutonio que se fisionan espontáneamente fue aproximadamente constante en todos los materiales del sistema solar, cabe idear una ecuación relacionada con la proporción entre el número de huellas dejadas por el plutonio 244 y el número de huellas dejadas por el uranio 238. Ahora bien, las huellas dejadas por la fisión de ambos isótopos son físicamente indistinguibles. Por consiguiente, para determinar la edad de una muestra extraterrestre se empieza por calcular cuántas huellas de fisión estarían presentes en ella según una doble base: la cantidad mensurable de uranio que contiene y el tiempo transcurrido. Como al inicio del cómputo se ignora el tiempo transcurrido, se precisa iteraciones sucesivas para llegar a un cálculo estimativo satisfactorio. La diferencia entre el número de huellas imputables a la fisión del uranio y el mayor número de huellas efectivamente presentes en la muestra puede atribuirse a la fisión del plutonio y se puede establecer la proporción entre ambas clases de huellas.

El método puede parecer sujeto a error si no se toma enteramente en cuenta el breve período de semidesintegración del plutonio 244. De hecho, a lo largo del período comprendido entre 4600 y 4000 millones de años el número de huellas imputables a la fisión espontánea del plutonio muestra una disminución de cien es a uno, en comparación con la disminución de sólo el 20 por ciento o algo así en el número de huellas atribuibles a la fisión del uranio. Esto hace que el resultado último del cálculo sea bastante insensible a las variaciones de edad finalmente elegidas para la muestra, en el proceso de calcular el número de huellas imputables a la fisión del uranio.

A causa del breve período de vida media del plutonio 244, la razón plutonio/uranio cambió rápidamente a poco tiempo de iniciarse la historia del sistema solar. En consecuencia, el método de datación absoluta resulta especialmente sensible ante muestras que han sobrevivido desde el período transcurrido entre 4600 y 4000 millones de años atrás. Por ejemplo, si se acepta el consenso acerca de que la proporción entre el número de átomos de plutonio 244 y uranio 238 en cualquier muestra de la materia inicialmente condensada del sistema solar fue de 0,0154, la proporción entre el número de huellas debidas a la fisión del plutonio y las debidas a fisión del uranio disminuye desde 83 en una muestra de 4600 millones de años de edad a 0,6 en una muestra de 4000 millones de años de edad.

La mayoría de los meteoritos tienen al menos 4000 millones de años de edad, y son, por tanto, buenos candidatos para precisar mediciones de edad basadas en la fisión espontánea del plutonio y del uranio. Ha sido posible, incluso, determinar las edades, diferentes al parecer, de minerales con distintas características de recocido contenidos dentro de un mismo meteorito, de manera que puede reconstruirse una velocidad de enfriamiento para el meteorito completo. Las huellas de fisión de plutonio pueden observarse también en cristales de material lunar. Pero las rocas lunares tienden a ser más recientes que los meteoritos; la mayoría de ellas tienen menos de 4000 millones de años de edad. Por este motivo, las relaciones entre huellas de fisión de plutonio y uranio no son tan útiles en ellas como en los meteoritos.

Entre los meteoritos verosímilmente primitivos conocidos como condritas carbonáceas, hay algunos que constan de una matriz, semejante a la arcilla, que contiene unos fragmentos minerales de mayor tamaño y, ocasionalmente, unos cóndrilos: gotitas esféricas cristalinas producidas probablemente por fusión. Las condritas carbonáceas se parecen a las rocas sedimentarias terrestres en cuanto a que, de ordinario, una determinación de edad, ya sea que se realice sobre una muestra bruta, ya sea sobre componentes cuidadosamente segregados, debería indicar la edad de los componentes y no la época en la cual fue formado el propio conglomerado.

Price y yo advertimos que los cristales de olivino, grandes y bien formados, empotrados en las condritas, estaban prácticamente desprovistos de huellas interiores. Por lo que respecta a las huellas de fisión, esto era de esperar dado lo escaso del contenido de uranio del olivino.

En cuanto a las huellas producidas por rayos cósmicos, su escasez en los cristales sugería que las condritas carbonáceas no sufrieron bombardeos intensos de estos núcleos energéticos. En cambio, en la superficie de los cristales se encontró un número apreciable de huellas de fisión de átomos presentes en la matriz arcillosa que circundan al meteorito. La observación era coherente con la mayor concentración de uranio (y en una ocasión de plutonio) en la matriz de los meteoritos, en comparación con la bajísima concentración de uranio en el olivino.

Las huellas superficiales podrían haber comenzado a acumularse, obviamente, sólo después de que los dos componentes de los meteoritos hubieron entrado en estrecho contacto. Las observaciones nos llevaron entonces al estudio de lo que hemos dado en llamar las "edades de contacto" de las condritas carbonáceas. Contando las huellas de fisión sobre las caras de los cristales, pudimos determinar una fecha para la formación del conglomerado, no la edad o edades de sus distintos componentes.

Para sorpresa nuestra, teniendo presente que, en función de las características mineralógicas y químicas, las condritas carbonáceas se han mostrado siempre más primitivas que los meteoritos rocosos y de hierro, nuestros análisis indican que aquéllas se formaron bastante tarde dentro de la historia temprana del sistema solar: quizá hace 4200 millones de años. La edad de la mayoría de los meteoritos pétreos y férricos se acerca a los 4600 millones de años. ¿En qué parte del sistema solar se hallaban alojados los materiales que componen las condritas durante esos 400 millones de años?

Los que trabajamos con la nueva técnica de cronología radiométrica, que hacen posible las huellas de fisión, continuamos tras este interrogante y otros parecidos. La datación mediante huellas de fisión no iguala a otros métodos radiométricos en cuanto a precisión, pero es probable que cambie tal estado de cosas. Para mí, los aspectos más atractivos del método son su simplicidad y lo frecuentemente que puede emplearse cuando es difícil o imposible recurrir a otras técnicas de cronología absoluta.

Juegos matemáticos

Curvas "monstruosas" que obligan a redefinir el término "curva"

Martin Gardner

Un aspecto fascinante de la historia de las matemáticas es la forma como las definiciones de ciertas clases de objetos matemáticos se revisan continuamente. El proceso suele ser el siguiente: a la clase en cuestión se le da el nombre *x*, y se define provisionalmente, sin mayor precisión, de acuerdo con la intuición y el uso. Alguien, más tarde, descubre un objeto excepcional, que se ajusta a la definición pero en el que no se pensó cuando se designó con *x* a ese grupo de objetos. Se propone una nueva, y más exacta, definición que abarque, o excluya, al objeto excepción. La nueva definición vige "operante" en tanto en cuanto no aparezcan otras excepciones. Si éstas surgen, se revisará de nuevo la definición y, así, el proceso está abierto ad infinitum.

Las excepciones que contradicen de plano la intuición primera o anterior reciben el nombre de "monstruos". Y de monstruosas suelen clasificarse. Este mes nos ocuparemos de la "curva", describiremos algunos "monstruos" que forzaron a su redefinición e introduciremos otro nuevo, terrible, que fue capturado el año pasado por William Gosper, joven y brillante científico experto en ordenadores que vive hoy en Los Altos Hills, California.

Los matemáticos griegos de la Antigüedad aportaron varias definiciones de curva. Así, curvas son las intersecciones de dos superficies (en efecto, las secciones cónicas, por ejemplo, se generan cuando un cono se corta por un plano con cierta inclinación); también, curvas son el lugar geométrico de un punto en movimiento. Confirman esta segunda definición la circunferencia, que se traza mediante el pie giratorio de un compás; la elipse, que se construye por una pluma móvil, que se mueve retenida por un cordel sujeto por dos clavijas fijas. E, igualmente, se pueden describir otras curvas generadas por mecanismos más complicados.

La geometría analítica del siglo XVII hizo posible una definición más precisa. Las curvas comunes pasaron a ser los diagramas de ecuaciones algebraicas. ¿Podría definirse una curva plana como el lugar geométrico de los puntos del plano cartesiano que satisfacen una ecuación en dos variables? No, ya que los diagramas de ciertas ecuaciones están formados por líneas discontinuas o puntos aislados; nadie se atrevería a llamar curva a ninguno de tales diagramas. El cálculo abrió una salida: la palabra "curva" se limitó al lugar geométrico de los puntos que satisfacen ecuaciones que son funciones continuas.

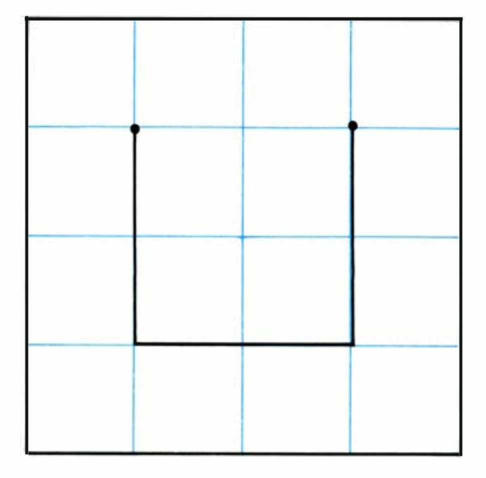
Intuitivamente parece obvio que, si una curva representa una función continua, será posible diferenciar la función, o, lo que es equivalente, será posible trazar una tangente en un punto cualquiera de la curva. Sin embargo, en la segunda mitad del siglo pasado, los matemáticos empezaron a encontrar todos los tipos de curvas monstruosas que no tienen una única tangente en ninguno de sus puntos. Uno de los monstruos más inquietantes fue la curva descrita en 1890 por el matemático y lógico italiano Giuseppe Peano. Demostró que un solo punto, moviéndose continuamente sobre un cuadrado, podía (en un tiempo finito) pasar al menos una vez por cada punto del cuadrado y de su frontera (en realidad, una curva tal tiene que pasar por una infinidad de puntos más de una vez). La curva de Peano es una representación legítima de una función continua. Sin embargo, en ningún instante puede determinarse la dirección de movimiento del punto generador.

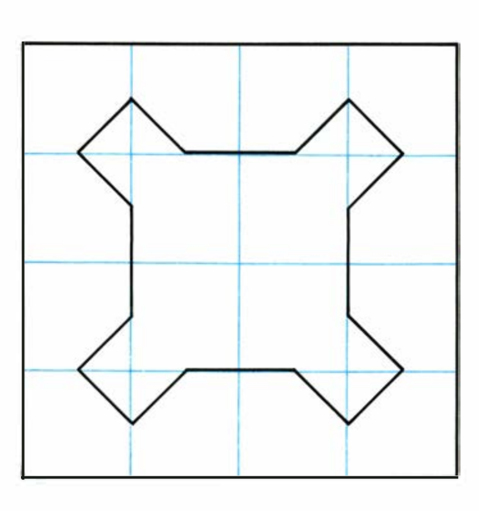
David Hilbert propuso un método simple para generar una curva de Peano con dos puntos finales (abierta). Se trata de un procedimiento recursivo cuyas cuatro primeras etapas aparecen claramente en las figuras superiores de la ilustración de la derecha. En el límite, la curva comienza y termina en las esquinas superiores del cuadrado. Las cuatro etapas iniciales que aparecen en la ilustración inferior muestran cómo Waclaw Sierpinski generó una curva de Peano cerrada.

En ambos casos, se utilizan las gráficas sucesivas como aproximaciones cada vez más precisas de la curva límite. Esta, en cada versión, es infinitamente larga y llena completamente el cuadrado, aun cuando en cada aproximación se omite una infinitud no numerable de puntos cuyas coordenadas son irracionales. En general el límite de una sucesión de curvas de aproximación puede pasar por muchos puntos que no pertenecen a ninguna de las aproximaciones. La curva de Sierpinski delimita un área igual a 5/12 del área del cuadrado. Pero no del todo. Las construcciones dan este valor como límite, pero la propia curva, la que es representación de la función límite, ésa no permite distinguir entre su interior y su exterior.

Las curvas de Peano causaron una profunda conmoción en el mundo matemático. Sus trazados son unidimensionales, pero en el límite ocupan un área bidimensional. ¿Deben llamarse curvas? Para mayor complicación, las curvas de Peano pueden dibujarse con la misma facilidad para llenar cubos e hipercubos.

En 1904, el matemático sueco Helge von Koch propuso otro agradable "mons-





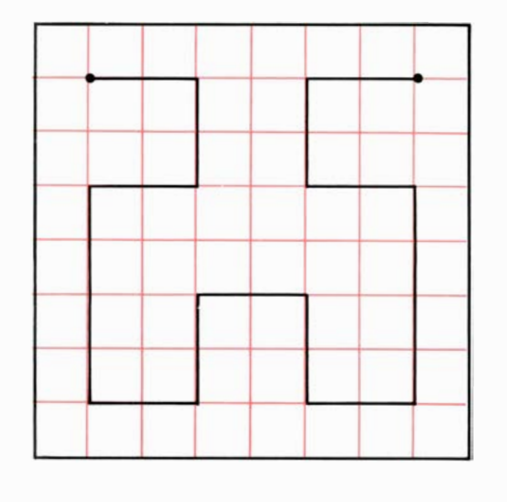
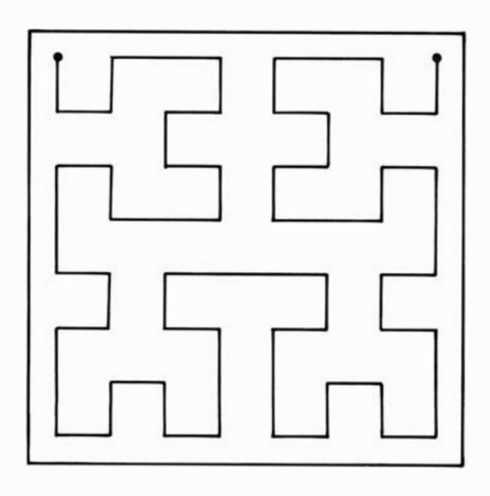
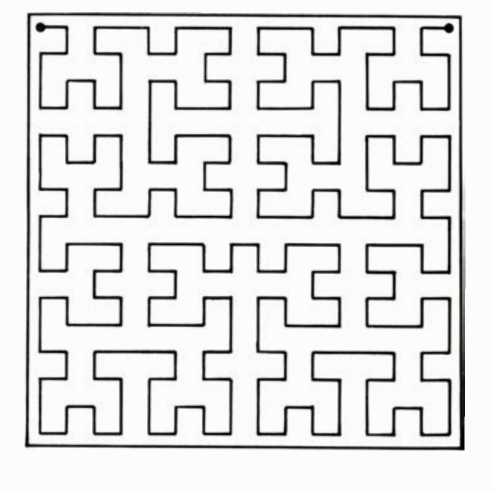
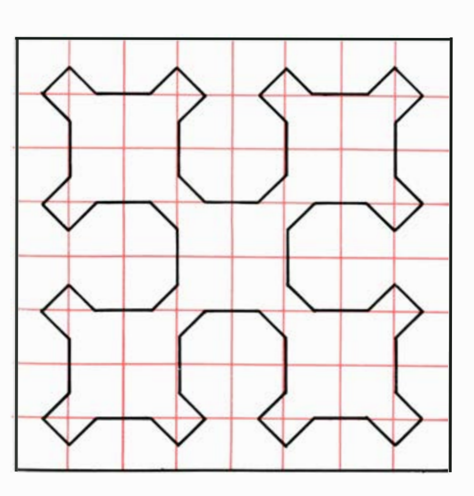
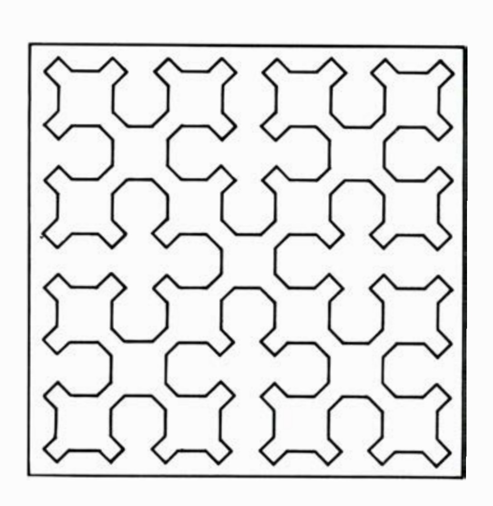
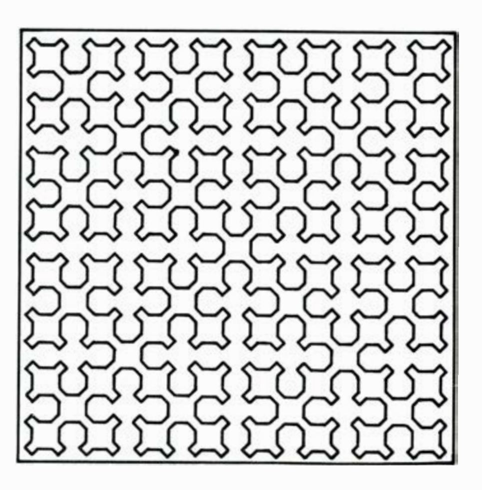
truo", al que se ha llamado ahora curva "snowflake" (curva en copo de nieve). Se parte de un triángulo equilátero, al que se aplica la simple construcción recursiva que aparece en la ilustración superior de la página *106*, a fin de generar una curva sinuosa, similar a la figura de un copo de nieve. Se trata de una curva infinita en longitud en el límite, pues la distancia entre dos puntos arbitrarios de la curva es infinita. El área limitada por la curva equivale exactamente a los 8/5 del triángulo inicial. Igual que en las curvas de Peano, sus puntos carecen de tangente única, lo que significa que su función generatriz, aunque continua, no es derivable.

Si los triángulos se construyen hacia el interior en vez de hacia el exterior, se obtiene la curva anticopo de nieve. Su perímetro también es infinito y delimita una infinitud de regiones discontinuas cuya área total equivale a 2/5 del triángulo original. Se puede partir de otros polígonos regulares que tengan más de tres lados y construir polígonos similares en el tercio central de cada lado. Así, un cuadrado con sus cuadrados adicionales construidos hacia fuera da lugar a la curva de puntadas cruzadas, de longitud infinita y de superficie igual al doble que la del cuadro de partida (Véase mi *Sixth Book of Mathematical Games from Scientific American*, cap. 22). Si los cuadrados adicionales se construyen interiormente (van hacia dentro), se obtiene la curva opuesta, es decir, antipuntadas cruzadas; en cuyo caso, se trata de una curva de longitud infinita que no delimita área alguna. Construcciones semejantes a partir de polígonos con más de cuatro lados producen curvas que se autointersecan.

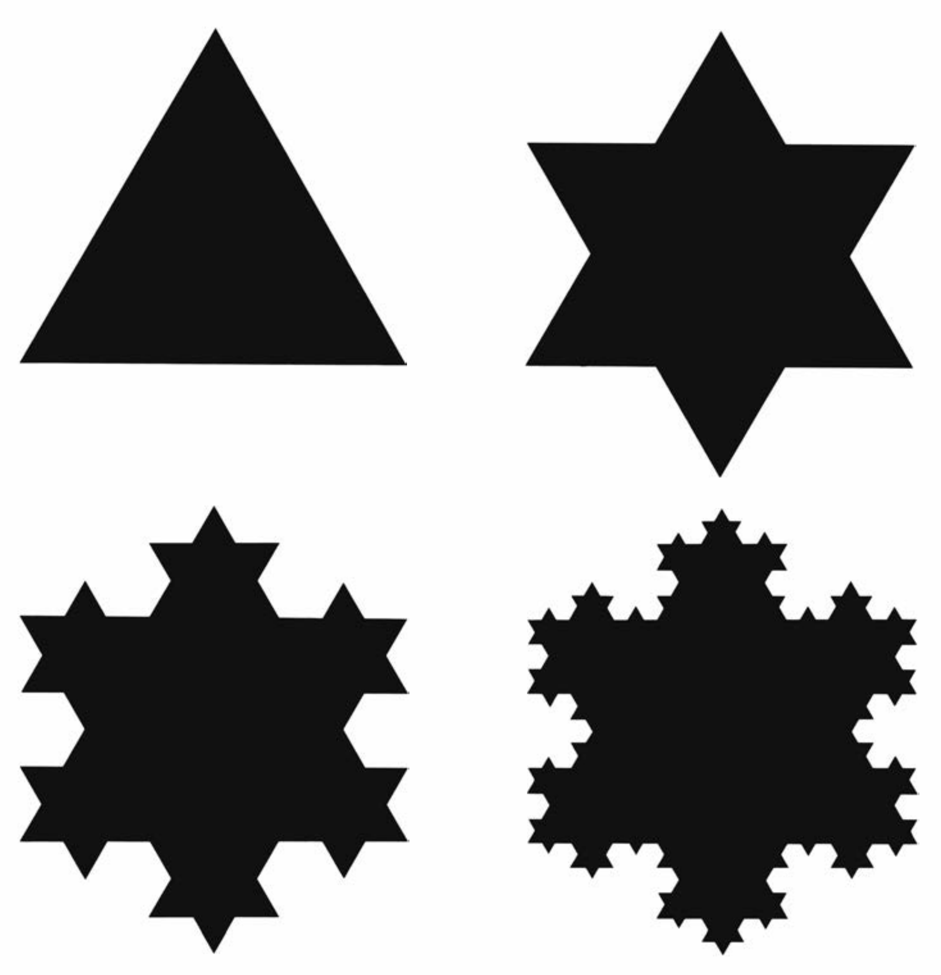
En el espacio tridimensional, pueden construirse superficies semejantes a la de copo de nieve por división de cada cara de un tetraedro regular en cuatro triángulos equiláteros y formación de un tetraedro más pequeño sobre el triángulo central, continuándose así el proceso indefinidamente. En el límite, se obtiene una superficie espinosa de área infinita, por más que limita un volumen finito. El cubo produce una superficie análoga a la curva de puntadas cruzadas.

Se puede generalizar todavía más si dividimos los lados de un polígono regular en más de tres partes. Verbigracia, se dividen los lados de un triángulo equilátero en cinco partes y se construyen triángulos semejantes en las secciones segunda y cuarta; y se repite hasta el límite. Una última generalización puede hacerse con una curva cerrada que se divida en segmentos congruentes; se alteran luego los segmentos arbitrariamente con tal que la alteración sea, a su vez, segmentable en segmentos congruentes, y así hasta el límite. Pueden realizarse construcciones parecidas sobre superficies de sólidos. Naturalmente, los resultados podrían ser curvas o superficies confusas y autointersectantes sin ningún interés especial.

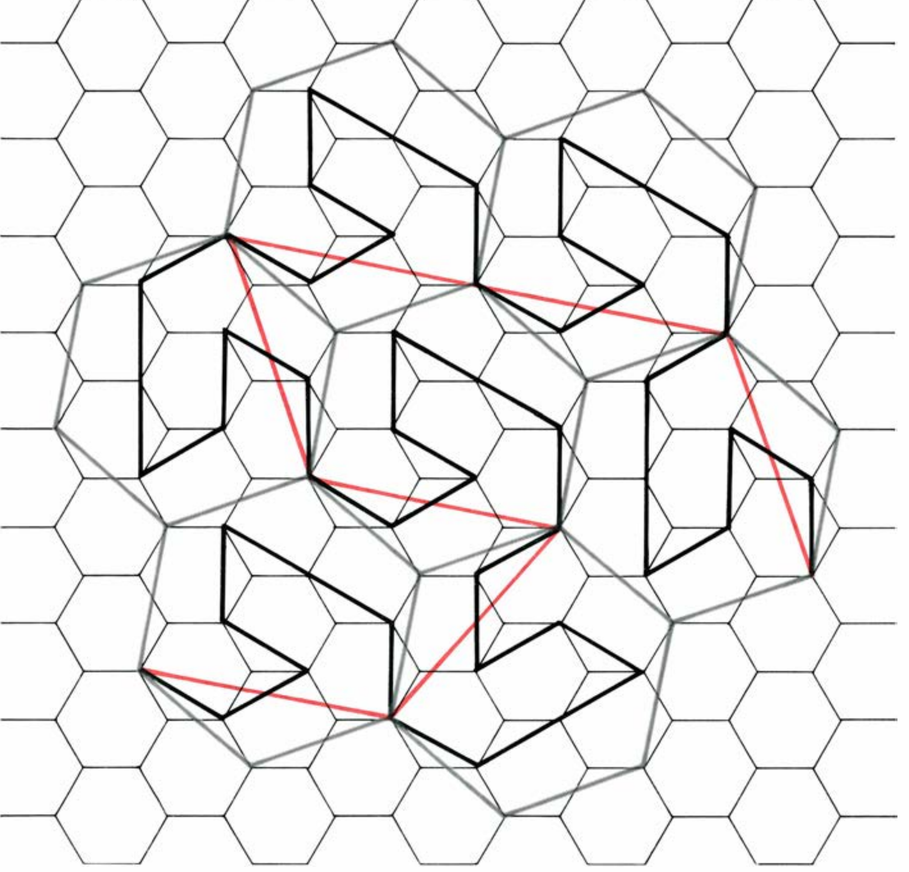
Se podría escribir todo un libro sobre otros tipos de monstruos patológicos planos. El topólogo holandés L. E. J. Brouwer publicó en 1910 una construcción recursiva para la sección de una región en tres subregiones de una forma tan singular que, en el límite, las tres regiones coinciden en cada punto. La construcción de Brouwer se generaliza hasta dividir una región en n subregiones, que coinciden todas en cada punto. Otra familia de monstruos, recién descubierta, son las curvas dragón, introdu-

Curvas de Peano: la de Hilbert abierta (**arriba**), *y, la de Waclaw Sierpinski, cerrada* (**abajo**)



Los cuatro primeros órdenes de la curva en copo de nieve de Helge von Koch



La **"curva serpenteante"**, *de Gosper, de primer orden* (**color**) *y de segundo orden* (**negro**)

cidas en las páginas de *Scientific American*, en 1967, y que fueron sometidas a examen por Chandler Davis y Donald E. Knuth en el *Journal of Recreational Mathematics*, tres años más tarde.

Me place presentar ahora el nuevo monstruo de Gosper, una bonita curva a la que él llama curva serpenteante. Se parte, para su construcción, de un modelo de siete hexágonos regulares *(véase la ilustración inferior de la página presente)*. Se unen ocho vértices, según muestra la línea de color, construida a partir de siete segmentos de igual longitud. La línea de color es la curva serpenteante de primer orden. Indicada en negro, la línea de segundo orden se obtiene por la substitución de cada segmento de color por otra línea similar retorcida de siete segmentos. Cada segmento de la línea negra es $1/\sqrt{7}$ de la longitud de un segmento de color; esta proporción se mantiene en cada fase de la construcción.

El procedimiento recursivo se continúa para originar curvas serpenteantes de órdenes superiores. La ilustración de la página opuesta muestra dos dibujos, realizados mediante ordenador, de curvas serpenteantes pertinentes al tercer y cuarto orden. Por división del plano en blanco y negro, de forma que la línea bifurcante cruce los extremos terminales de la curva serpenteante, advertiremos que la curva corta el plano en dos regiones que se retuercen siguiendo, aproximadamente, el mismo modelo.

La curva que representa el límite de sucesivas funciones serpenteantes pasa por todos los puntos de su región una vez por lo menos, llenando completamente el espacio. La curva es infinita y no diferenciable. Como si se tratara de una recta, es parecida a sí misma en el sentido de que, si se extiende cualquier porción de ella, el modelo aparece siempre igual. Las curvas en copo de nieve tienen la misma propiedad.

"Es evidente que no disponemos de curvas en copo de nieve, en física", escribe Philip Morrison. "La naturaleza no da infinitudes ni siquiera a escala de las colisiones moleculares. Hay un corte a nivel de amstrongs. Pero abundan las sorpresas." Por sorpresa, Morrison entiende aquí los modelos naturales aleatorios que tienen, desde el punto de vista estadístico, la propiedad de autoparecerse conforme se van haciendo prolongaciones sucesivas. Estas observaciones aparecieron en una crítica a un valioso libro francés, intitulado: *Les Objets Fractals: Form, Hasard et Dimensions*, de Benoît Mandelbrot.

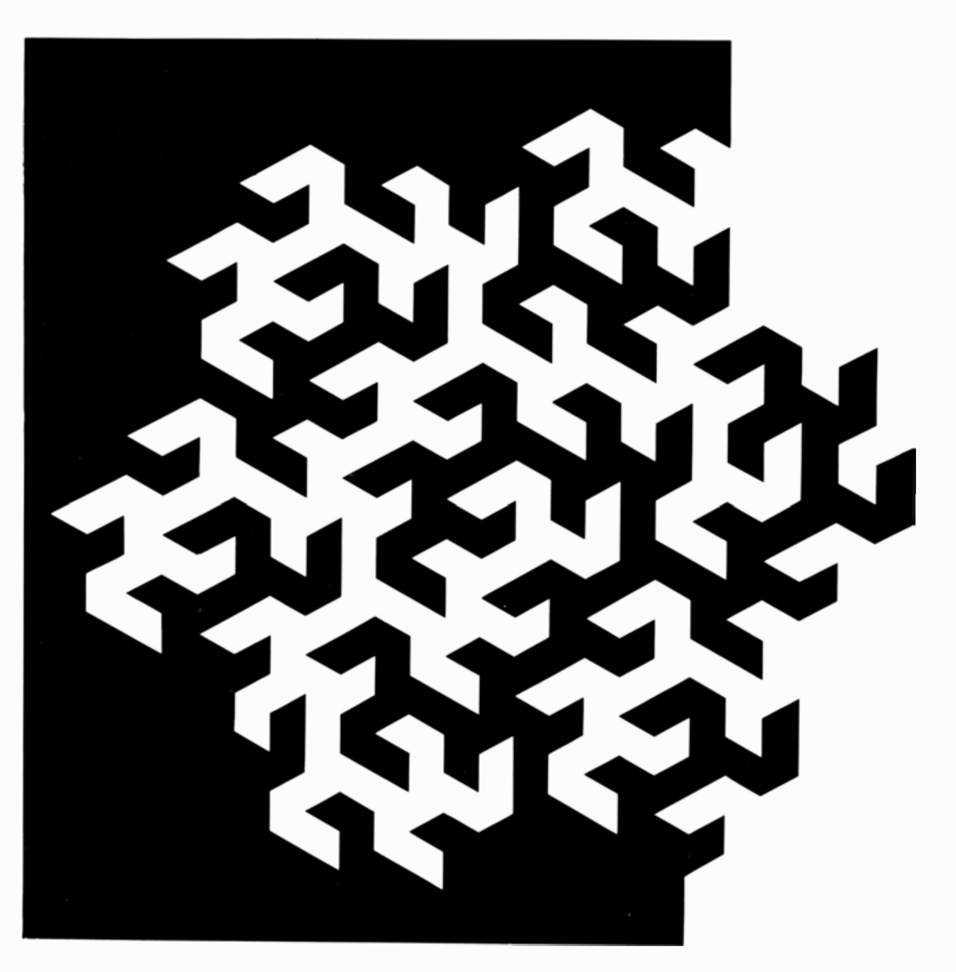
Mandelbrot es un matemático francés, de origen polaco, que trabaja actual-

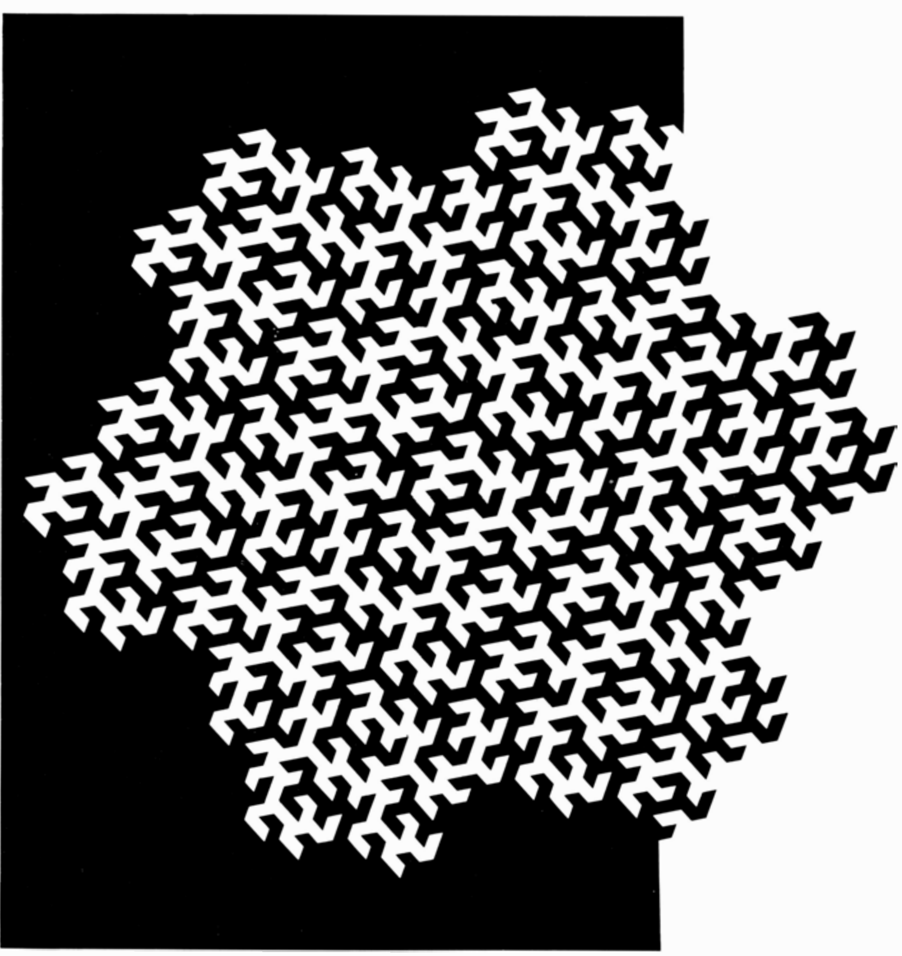
mente como becario de IBM en el Thomas J. Watson Research Center, en Yorktown Heights, Nueva York. Como Stanislaw Ulam y otros muchos matemáticos polacos relevantes, Mandelbrot ha barajado en su carrera una mezcla maravillosa de matemático puro y matemático aplicado, en especial por lo que se refiere al uso de las ciencias exactas en física y en economía. Su maestro, el matemático francés Paul Lévy, fue quien hizo el primer estudio sistemático sobre curvas semejantes a sí mismas estadísticamente. Nadie reparó en ello, cual si se tratara de una rara curiosidad, hasta que Mandelbrot las reconoció como herramienta fundamental para acometer el estudio de un sinfín de fenómenos físicos.

El libro de Mandelbrot citado está lleno de figuras relativas a esos fenómenos (en especial la edición que está a punto de salir en inglés). Considérese las líneas del litoral. Sus irregularidades de entrantes es estadísticamente parecidas a sí mismas. Las líneas litorales se muestran las mismas desde gran altura o desde baja altura. Carece de sentido hablar de "longitud" de una línea del litoral porque depende absolutamente de la precisión de la medida. Como escribió Morrison: "las líneas litorales de la cartografía, de mapas a escalas variables, obedece a una fuerte ley como las curvas en copo de nieve, desde una escala de cientos de kilómetros hasta otra de metros, en que la geografía cede el puesto a los guijarros".

Un nuevo ejemplo lo encontramos en la superficie lunar. ¿Recuerdan las primeras fotografías de la luna tomadas por satélite en órbitas en su entorno? Los desniveles de superficie se observaban casi igual que en las fotografías tomadas con telescopio desde la tierra. Sólo variaba el tamaño de los cráteres. El mismo autoparecido aleatorio se encuentra en la superficie de ciertos quesos, en la distribución de las estrellas por el firmamento, en el perfil de las montañas, en la turbulencia atmosférica, en los ruidos percibidos y en otros innumerables modelos naturales. El movimiento browniano de partículas suspendidas se aproxima a una curva estadísticamente autoparecida que (en el límite) tiene una longitud infinita y carece de tangentes.

Volvamos a la curva de serpenteo, y fijémonos atentamente en su perímetro y en una asombrosa paradoja. El perímetro puede construirse por un procedimiento recursivo mucho más sencillo que el seguido para realizar la curva de serpenteo. La ilustración superior de la





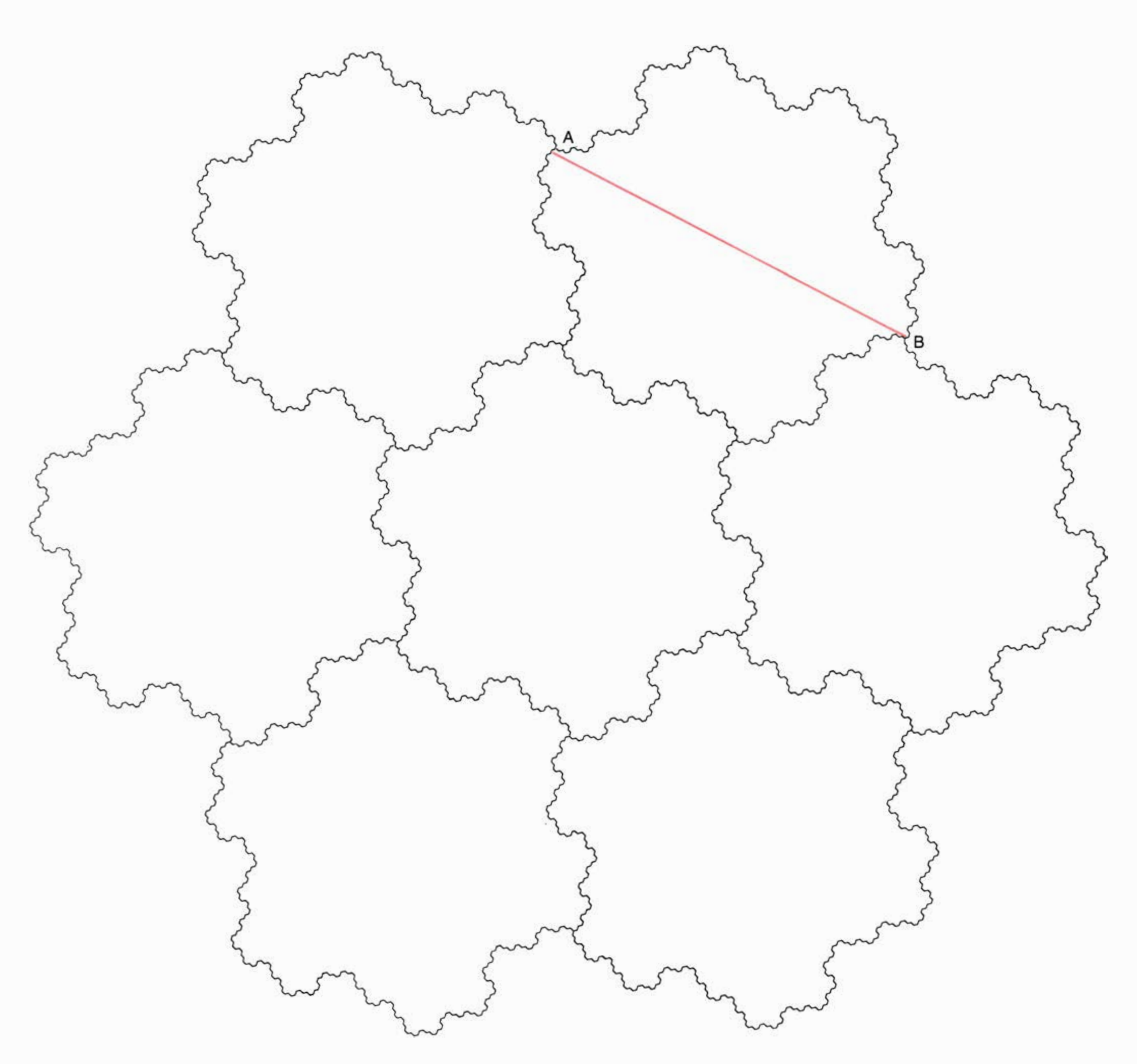
Curvas serpenteantes de orden tres (**arriba**) *y de orden cuatro* (**abajo**)

página *109* muestra su desarrollo. Se parte de un hexágono regular. Se substituye luego cada lado por una línea en zigzag *(color)* de tres segmentos iguales; cuya magnitud es de $1/\sqrt{7}$ del lado del hexágono original. El polígono resultante es un 18-gono convexo. Puesto que la línea en zigzag añade una cantidad de área igual a la que resta, síguese que el polígono 18-gonal tiene la misma área que el hexágono de partida. Se repite la construcción a partir de cada uno de los 18 lados para formar un 54-gono, y así el proceso recursivo puede continuar hasta el límite. En cada etapa, el número de lados se triplica, pero el área no cambia nunca. En el límite, el área que ocupa la curva de serpenteo es exactamente igual al área del hexágono original.

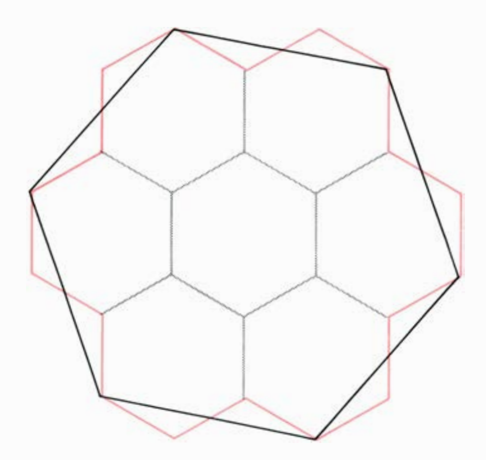
Toda la región posee una propiedad relevante: puede dividirse en siete subregiones, tal como muestra la ilustración inferior de esta página siendo cada una de ellas una copia exacta de toda la región.

Y ahora vayamos a la paradoja. ¿Cuál es la razón existente del área de una subregión respecto a la región entera? La relación es, evidentemente $1/\sqrt{7}$, puesto que siete subregiones idénticas forman la región entera. Considerémoslo ahora desde otra óptica. Recordemos que las áreas de figuras semejantes son proporcionales al cuadrado de sus dimensiones lineales. Si se cortan las fronteras de tres subregiones, como indica la línea *AB* de la ilustración *(pág. 108)*, los seis segmentos encajan exactamente en el perímetro de toda la región. Ciertamente, la frontera de una subregión tiene que alargarse en un factor 3 para ajustarse a la frontera de toda la región. Pero si esto es verdad, las áreas tienen que hallarse en una razón de 1/3 al cuadrado, es decir, 1/9. Hemos probado, creemos, que la razón de las áreas es 1/7 y 1/9. Como Gosper preguntaba cuando presentó por vez primera la paradoja, *¿qué es lo que no encaja? (Was ist los?)*

La respuesta se apoya en el carácter peculiar y contraintuitivo de la frontera



Una paradoja de la **"curva serpenteante"**



Construcción de la frontera de la **"serpenteante"**

patológica. No existe la menor duda respecto a la superficie que delimita. Es, efectivamente, siete veces el área de una subregión. No podemos decir lo propio en cuanto a claridad del comportamiento de la frontera. Sigue siendo cierto que la frontera de una subregión es semejante a una frontera total, pero si una tiene que ser congruente con la otra se tendrá que agrandar la subregión en un factor lineal de $\sqrt{7}=2{,}645...$, y no por un factor de tres, como podría parecer.

Surge ahora una cuestión importante. ¿Qué 'dimensión' debe asignarse a la frontera de la curva de serpenteo? Al igual que la curva en copo de nieve, descansa en una extraña zona crepuscular entre una y dos dimensiones. En 1919, el topólogo alemán Felix Hausdorff resolvió la dificultad dando divisiones fraccionarias a tales curvas, que es lo que Mandelbrot denominaba en su libro como dimensiones "fractales". No debe confundirse con lo que se conocen como espacios de Hausdorff, que son estructuras topológicas que no tienen nada que ver aquí.

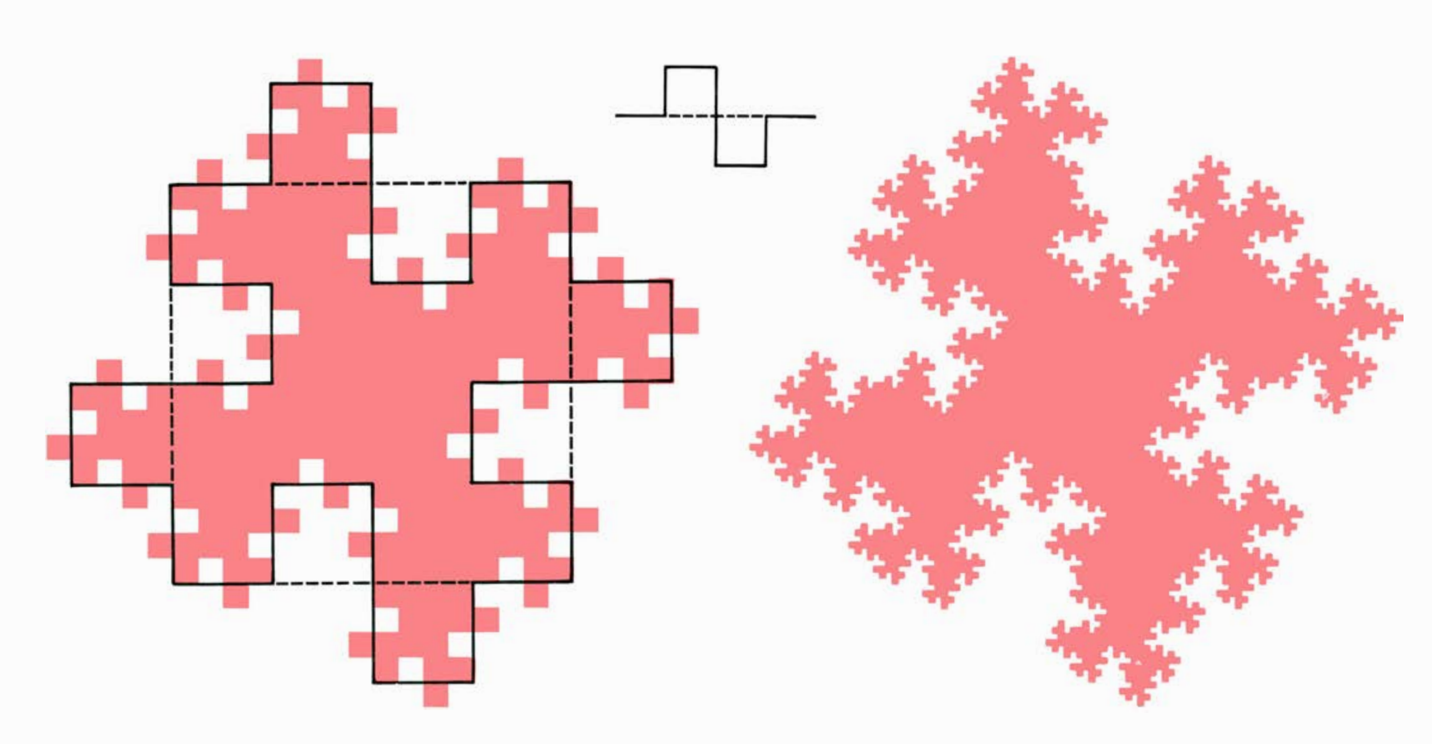
Para comprender cómo se calcula la dimensión "fractal" hay que considerar primero un segmento lineal. Si agrandamos dicho segmento en un factor x, la línea agrandada puede cortarse en y copias del original. La dimensión de la línea es el exponente de x que da y. Para el segmento lineal, en este caso, x equivale a y. Verbigracia, doblando la línea se producen dos copias. El exponente será log (base 2) de 2, o log 2/log 2 = 1.

Se agranda un cuadrado de forma que la arista se doble; el cuadrado construido puede seccionarse en cuatro copias iguales al original. En general, si se agranda una figura plana por un factor lineal x, su área crece por un factor de x^2. Su dimensión es log (base 2) de 8 o log 4/log 2 = 2. Si se dobla la arista del cubo, el cubo agrandado puede partirse en 8 copias del original; su dimensión será log (base 2) de 8 o log 8/log 2 = 3. Y análogamente para hipercubos en espacios euclidianos superiores.

La curva en copo de nieve se hace mediante la substitución reiterada de una línea por otra que sea 4/3 más larga.

Así pues, es razonable asignar a la curva límite una dimensión, llamada dimensión de Hausdorff, que sea log (base 3) de 4 o log 4/log 3 = 1,26181... La frontera de la curva serpenteante se construye por substitución repetitiva de una línea por una vía en zigzag que sea $3/\sqrt{7}$ más largo. Su dimensión de Hausdorff es log (base $\sqrt{7}$) de 3 o log 3/log $\sqrt{7}$ = 1,12915... Tiene longitud infinita: carece de áreas en unidades cuadradas y posee cierto "tamaño" finito expresado en unidades de potencia de 1,12915... Al igual que todas las curvas planas que llenan el espacio, la propia serpenteante tiene dimensión 2 en el límite, ya que llena completamente una región plana.

Como hemos visto, pueden producirse por simples procesos recursivos una enorme variedad de curvas tipo "fractal" que no se cortan a sí mismas. Podemos construir superficies "fractales" con dimensiones mayores que 2, sólidos "fractales" con dimensiones superiores a tres, etcétera. La ilustración de abajo, que reproduce otra que se halla en el libro de Mandelbrot, está construida por substitución de líneas de 4 unidades por líneas de 8 unidades (como se muestra en la parte superior) al objeto de formar una curva en copo de nieve, asimétrica y cuatriforme, cuya dimensión es log 8/log 4 = 1,5. Puesto que cada alteración de un segmento suma la misma cantidad de área que resta, la curva límite delimita la misma área que el cuadrado original.



Los tres primeros órdenes de la curva en copo de nieve, cuadrada, de Benoît Mandelbrot

La dimensión de Hausdorff es una medida de la complejidad. La curva en copo de nieve cuadrada es más compleja que la en copo de nieve de von Koch, porque su dimensión es mayor. Mandelbrot ha estado trabajando con tales curvas durante tanto tiempo que ha adquirido una aguda habilidad para mirar una nueva curva "fractal" y, por medio de una estimación intuitiva de su complejidad, adivinar su dimensión con gran exactitud.

A la vista de estas curvas locas, ¿cómo pueden los matemáticos actuales definir una curva? El panorama está tan lleno de monstruos, que no cabe una definición única que abarque a todos los objetos a los que la palabra "curva" se aplica comúnmente. Los topólogos definen la curva como el conjunto de puntos compacto, conexo y que forma un continuo unidimensional. Sin embargo, para poner en claro la definición, se requeriría un voluminoso tratado de topología. La definición abarca curvas con un comportamiento regular en el sentido de que representan funciones con derivadas, pero no abarca ciertos monstruos, no diferenciables, que hemos venido estudiando aquí.

Al intentar definir área y volumen, saltan a la vista monstruos más terroríficos que las curvas serpenteantes. Es un asunto que debe dejarse para otro artículo.

Uno de los problemas del último mes era adivinar cómo el Dr. Matrix hacía desaparecer una copa de vino colocada dentro de un cilindro. La copa estaba hecha de hielo, y guardada en un molde dentro de un congelador mientras el Dr. Matrix se disponía a la función. En el centro de la mesa, había un pequeño agujero en la base de un disco de metal ligero, de forma cónica, que se acoplaba con la pierna central hueca. El disco llevaba un hilo conductor, que se calentaba cuando el Dr. Matrix pulsaba el botón oculto en su mesa. Cuando la copa se derretía, el agua y el vino resbalaban por el interior del pie central de la mesa.

Es fácil demostrar cómo la fórmula del Dr. Matrix de dos variables $(b+1)/a$ genera una sucesión de números que se repite con período 5. Sea a el primer número de la sucesión y, b, el segundo; cuando la fórmula se aplica en forma recurrente, el tercer número es $(b+1)/a$, el cuarto es $(a+b+1)/ab$, el quinto es $(a+1)/b$, el sexto es a y el séptimo b. Aparentemente la fórmula fue dada a conocer por primera vez en la *Mathematical Gazette* por R. C. Lyness.

Taller y laboratorio

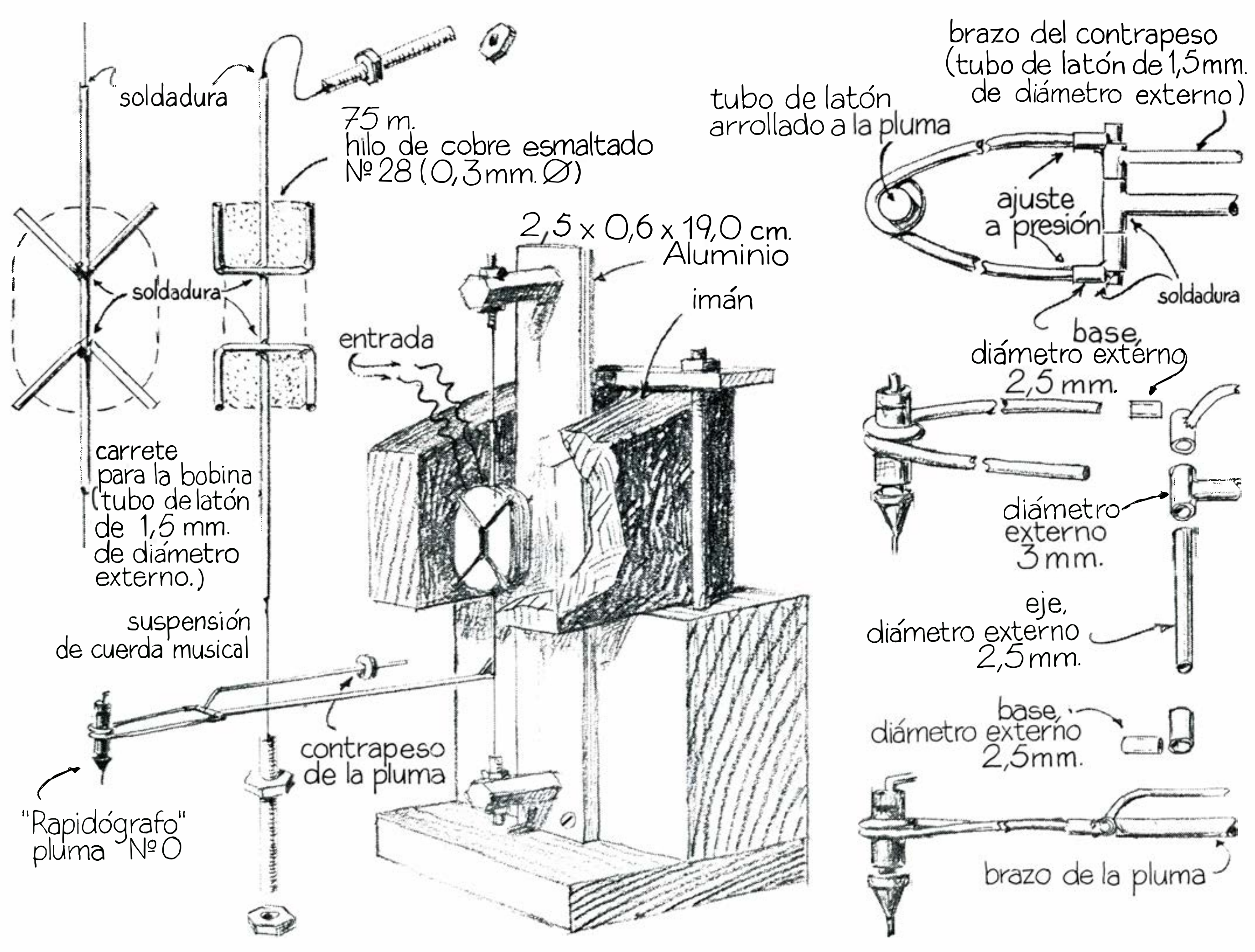
Un motor sencillo, con dispositivos compensadores, que permite realizar un registrador gráfico casero

C. L. Stong

A los aficionados les resulta difícil construir registradores gráficos capaces de inscribir señales de frecuencias superiores a cinco ciclos por segundo. Tales instrumentos se utilizan en los electrocardiógrafos y electroencefalógrafos y en otros aparatos que registran señales telemétricas. Para conseguir registradores capaces de responder a frecuencias de más de unos pocos ciclos por segundo, se ha solido reducir al mínimo tanto la masa como los rozamientos de las partes móviles. Las partes del motor que accionan la pluma pesan unos pocos gramos solamente y los ejes soporte giran sobre pivotes fabricados con precisión o sobre asientos de rubí. La fabricación de tales mecanismos requiere la habilidad de un relojero.

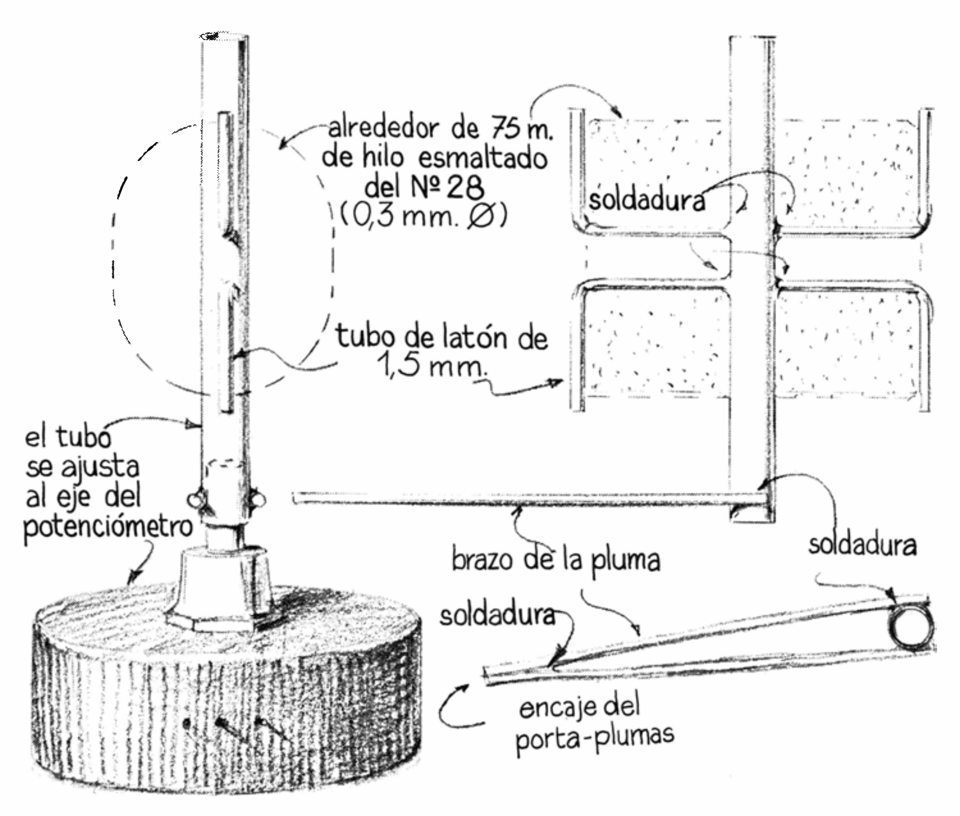
J. Barry Shackleford, un analista de modelos de la Computer Sciences Corporation de Huntsville, Alabama, ha recurrido a otro esquema para conseguir el buen funcionamiento que se desea. El motor que construyó para el accionamiento de la pluma es relativamente tosco y puede fabricarse en casa sin ningún gasto, pero le suministró potencia mediante amplificadores de transistores, con circuitos de realimentación para compensar sus deficiencias mecánicas. Aunque las características del registrador de Shackleford no igualan a las de los instrumentos comerciales, el aparato es, sin embargo, adecuado para efectuar experimentos de diversas clases. Shackleford describe su construcción como sigue:

Los registradores gráficos están compuestos de tres subconjuntos principales: un motor que acciona la pluma, un mecanismo que arrastra el papel debajo de la pluma a una velocidad conocida y un circuito eléctrico que aplica la corriente de señal al motor de la pluma. Yo he fabricado dos motores estructurales simi-



Motor de muelle de torsión para pluma, de J. Barry Shackleford

Detalles del conjunto articulado



Disposición de la bobina para el servomotor

lares, pero que emplean dispositivos de medida diferentes: un resorte de torsión en un caso y un mecanismo electrónico de realimentación en el otro.

Ambos motores tienen una bobina de hilo de cobre fino que puede girar libremente alrededor de su eje vertical situado entre los polos de un imán permanente. La bobina de uno de los motores está sostenida en sus extremos superior e inferior por una cuerda musical fina en tensión; la cuerda actúa como un resorte de torsión *(véase la ilustración de la izquierda en la página anterior).* Una corriente eléctrica aplicada a la bobina genera un campo magnético.

La fibra de torsión se ajusta inicialmente de tal manera que la bobina quede suspendida en una posición en la que el campo magnético inducido forme ángulo recto en el campo del imán. El campo inducido interactúa con el campo permanente creándose un par mecánico que hace girar la bobina a una posición para la que los sentidos de ambos campos coincidan. El par crece proporcionalmente a la corriente eléctrica en la bobina. La fibra de torsión ejerce un par antagonista que crece proporcionalmente al ángulo de la bobina con su posición de cero o posición inicial. El motor es esencialmente un galvanómetro del tipo desarrollado en el siglo XIX por el físico francés Arsène d'Arsonval. Su principio es similar al de los motores de la mayoría de los amperímetros y voltímetros, diferenciándose tan sólo en que los pivotes, el eje y el muelle capilar de los medidores convencionales se han sustituido por la fibra de torsión.

No es necesario ser muy habilidoso para fabricar el motor. La bobina se arrolla en un bastidor de tubo de latón de 1,5 mm. El brazo que sostiene la pluma se fabrica también de este tubo, cuyo peso es de alrededor de 130 mg por cm. Un tubo de unos 5 cm de longitud forma el eje rígido del bastidor.

A este eje se sueldan un par de soportes en forma de U con los brazos situados en dirección opuesta. La bobina se arrolla sobre los soportes, que tienen 2,5 cm de ancho y 1 cm de profundidad. Tubo de latón de este diámetro puede encontrarse en los establecimientos de artículos para aficionados, especialmente en los dedicados a aeromodelismo.

Corte el tubo colocándolo sobre una pieza plana de cartón y serrándolo con el cuchillo más afilado de la casa. Deje el tubo rodar libremente bajo el cuchillo de tal forma que la acanaladura resultante rodee el latón. La pared del tubo es delgada. Use una presión moderada para evitar aplastarlo. Luego habrá que volver a afilar el cuchillo. Las virutas de los extremos abiertos del tubo pueden eliminarse con un pequeño taladro.

Las partes se unen con soldadura. Para hacer la unión con un mínimo de material, se limpia primero el latón en los puntos que han de soldarse y se estaña cada uno de ellos con un soldador pequeño. Una vez dispuestas las partes en la posición deseada, y debidamente sujetas, se coloca una gota de soldadura en los puntos estañados y se calienta la junta con un mechero de propano ajustado para producir una llama muy pequeña.

entrada
imán
porta-plumas
articulado
potenciómetro
de realimentación

Vista general del servomotor

Una vez montado el bastidor, se añade la fibra de torsión, que es simplemente un trozo de cuerda musical de unas 8 décimas de mm de diámetro (calibre núm. 20 de Brown and Sharp). La cuerda Mi de un violín será suficiente. Se la hace pasar por dentro del eje del bastidor y se la suelda en su lugar en los extremos del mismo. Use un fundente ácido y poca soldadura para hacer la unión. Caliente con un soldador pequeño para evitar destruir el temple de la cuerda. Elimine el exceso de fundente ácido limpiándolo con alcohol y aplique una capa fina de cemento plástico al latón.

La bobina está formada por 75 m de hilo de cobre esmaltado de calibre 28 (0,3 mm de diámetro). Enrolle el hilo sobre el bastidor al azar, sin intentar hacer capas uniformes. La resistencia de la bobina resultante es de unos 15 ohmios. Los extremos de la bobina se conectan a porciones de hilo flexible aislado de 0,5 mm de diámetro. Soldar el interior del terminal flexible a un extremo del hilo de cobre, aislar la junta con un poco de cemento plástico y atarla al eje rígido con un hilo de seda antes de arrollar la bobina. Al terminar el bobinado, hacer lo mismo con el otro extremo y amarrar ambos terminales sobre el eje a una distancia de medio centímetro por encima de la bobina. El conjunto de la bobina pesará alrededor de 25 gramos.

El brazo que sostiene la pluma es un tubo de 32 mm de longitud. Soldar el brazo al eje rígido paralelamente al eje de la bobina. Añadir una abrazadera pequeña del mismo tubo para robustecer la junta.

Incidentalmente, la repuesta a la frecuencia del motor de la pluma varía inversamente a la longitud del brazo. Brazos de hasta 200 mm de longitud pueden utilizarse para registrar frecuencias de hasta dos o tres ciclos por segundo, tales como las ondas sísmicas y los microterremotos. Para registrar los latidos del corazón o las ondas cerebrales, la longitud del brazo desde el centro del eje rígido a la punta de la pluma no deberá ser mayor de 75 mm, incluyendo el conjunto articulado que sostiene la pluma.

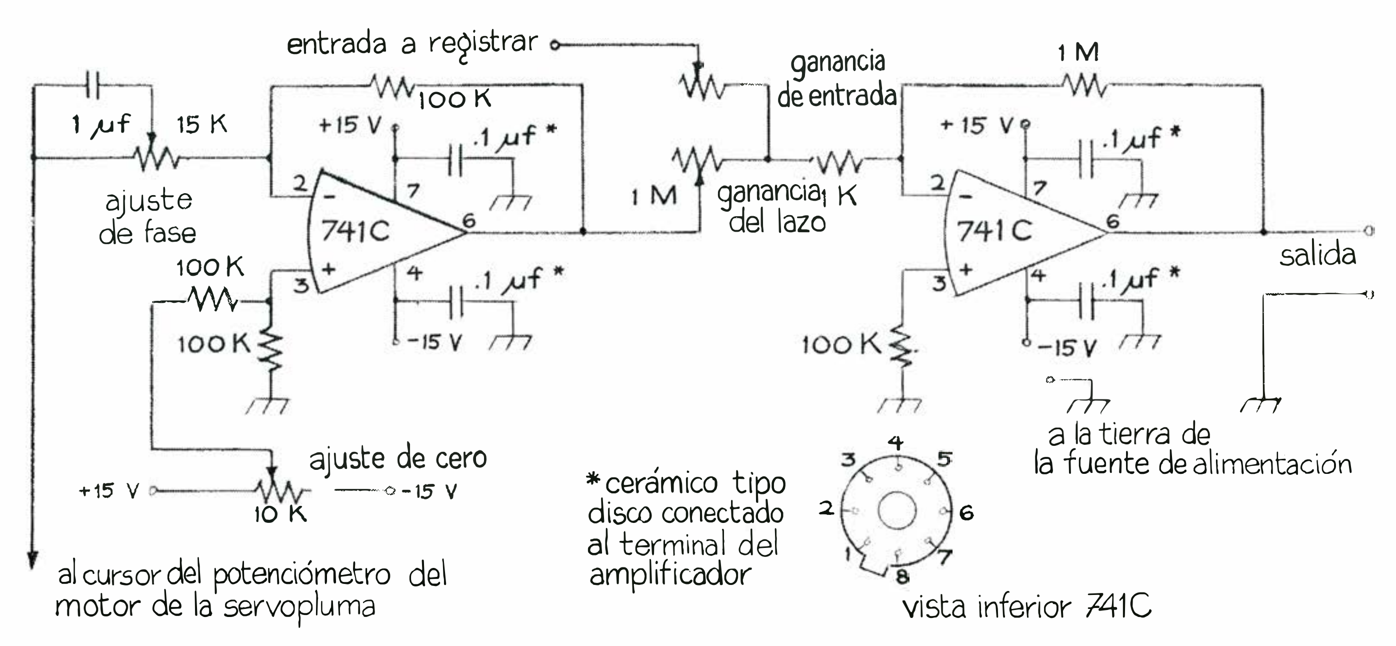
La articulación se hace con tubo de latón de dos diámetros: 3 mm y 2,5 mm *(véase la ilustración inferior izq. de la página 114).* Tubos de estos tamaños pueden introducirse uno dentro del otro y formar un conjunto deslizante. Un trozo de 6 mm del tubo de 3 mm de diámetro se suelda en ángulo recto al extremo del brazo de la pluma. Este tubo sirve como cojinete de la articulación. Otro trozo de 16 mm del tubo de 2,5 mm se desliza en el interior del cojinete y se centra para formar el eje. Se cortan dos collares del tubo de 3 mm, cada uno de 5 mm de longitud, y se deslizan sobre las partes salientes del eje. Con tubo de 1,5 milímetros de diámetro se hace un yugo para sostener la pluma.

La respuesta a la frecuencia varía de forma inversa a la inercia del sistema de escritura. Es preferible una pluma ligera de tipo capilar, como los radiógrafos números 0 o 1. Estas plumas pueden obtenerse en establecimientos dedicados a artículos de delineación. La punta tiene un depósito cilíndrico de tinta terminado en un cono del que sale un tubo capilar que llega hasta el papel. El flujo de tinta se regula mediante un hilo metálico fino que se prolonga a través del capilar hasta el papel.

La parte superior de este hilo termina en un peso cilíndrico que añade inercia al sistema. Se corta y se desecha el peso, se desliza el hilo en el interior de un tubo de latón de 1,5 mm de diámetro y se fija a él aplastando el tubo. El extremo superior del tubo se dobla en ángulo recto para que descanse sobre el borde superior del depósito de tinta. El codo se hace en un punto tal que el extremo inferior del hilo llegue a la punta del capilar. La sustitución del tubo de latón por el peso cilíndrico no sólo reduce la inercia del sistema, sino que además aumenta la capacidad del depósito de tinta.

El yugo que soporta la pluma se construye arrollando dos vueltas de tubo de latón alrededor del depósito. Los extremos del tubo se prolongan en ángulo agudo desde el lazo así formado. Cuando la distancia entre ellos es de alrededor de 13 mm, se doblan hasta hacerlos paralelos y se introducen dentro de los enchufes de la articulación *(véase la ilustración de esta pág.).* Roger Hayward, que ilustra esta sección, sugirió la sustitución de la articulación por una tira corta de chapa delgada de metal, como, por ejemplo, una arrastradera de latón. Esta tira sería más ligera que la actual articulación y más fácil de fabricar. Es algo que debe intentarse.

La bobina y el brazo de la pluma se sostienen en un soporte vertical que tiene un par de tornillos de ajuste enfrentados, a los que va unida la cuerda de torsión. La cuerda pasa por un hueco pequeño próximo al final de cada tornillo y se suelda a este lugar. Los tornillos



Esquema del circuito del amplificador diferencial y del amplificador sumador

son capaces de ejercer un esfuerzo de alrededor de 4,5 kg sobre la cuerda. El imán permanente está fijado a un bloque de madera unido a una base del mismo material.

La bobina se centra entre los polos en la región de campo magnético más intenso. La intensidad del campo puede examinarse visualmente cubriendo el imán con una hoja de cartón cuya superficie se empolva con limaduras de hierro. Con el imán fijo en su posición, se gira uno de los tornillos unidos a la cuerda de torsión media vuelta. Girar el otro tornillo en dirección opuesta hasta que el eje de la bobina forme un ángulo recto con el campo magnético. Apretar las tuercas. Este ajuste carga el hilo tanto a torsión como a tensión.

Mi instrumento tiene un imán cuyo entrehierro es de 3 cm, con una anchura de 4,5 cm. La inducción magnética del campo es de 2.075 Gauss. El motor de la pluma puede alimentarse desde cualquier amplificador que desarrolle 15 vatios y cuya impedancia de salida sea de unos 15 ohmios.

Mi segundo motor es similar al tipo de D'Arsonval, pero desarrolla un par mucho mayor. Es del tipo servo: la bobina se monta sobre el eje de un potenciómetro que desarrolla la tensión de referencia. La tensión de referencia se realimenta a la entrada de un amplificador diferencial. El sistema de realimentación sustituye los muelles de torsión del instrumento de D'Arsonval y estabiliza su funcionamiento. Por ejemplo, las variaciones en el rozamiento entre la pluma y el papel tienen poco efecto sobre la respuesta del sistema.

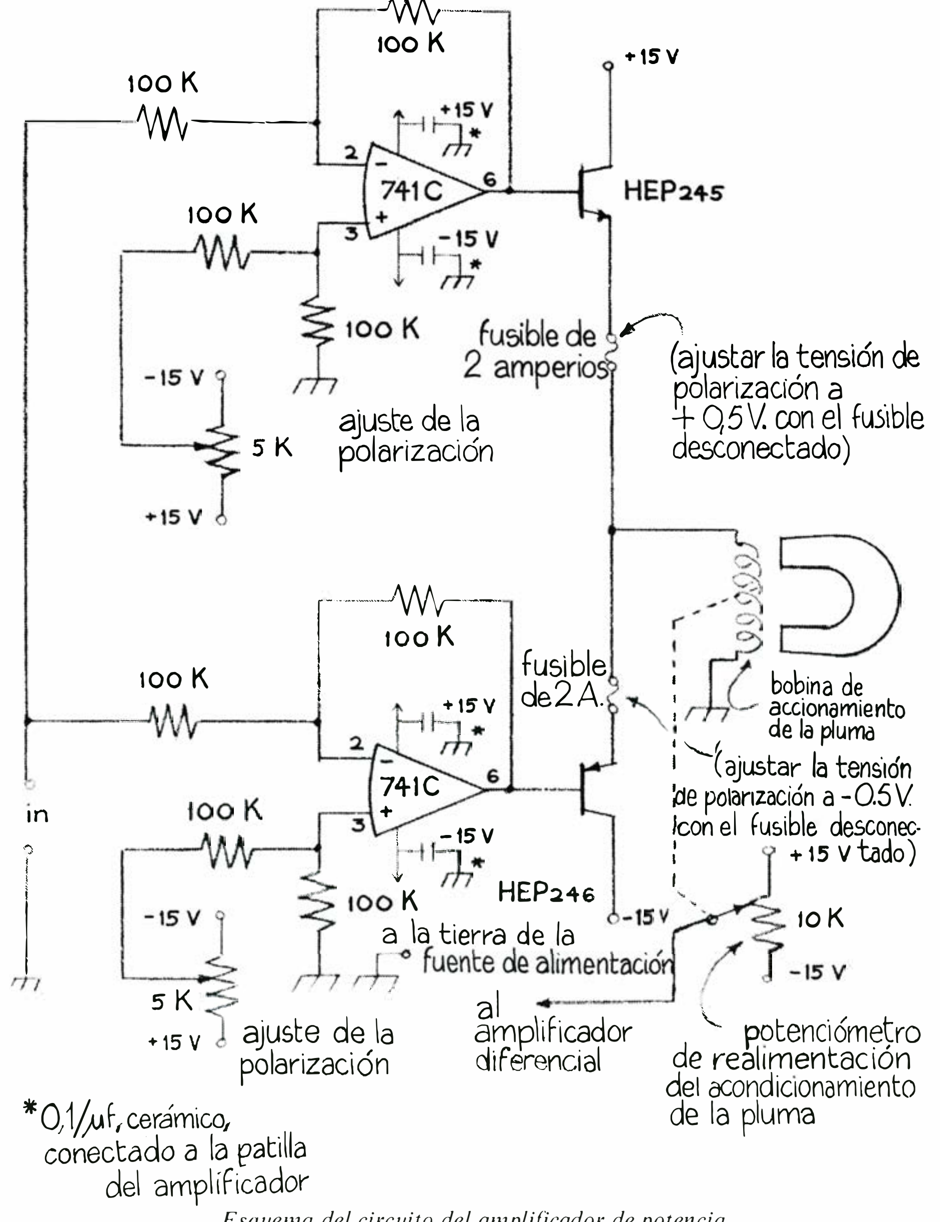
El potenciómetro debe ser del tipo de bajo rozamiento, preferiblemente con cojinetes de bolas. Un tipo apropiado es el Helipot 6502 que tiene una resistencia nominal de 10.000 ohmios. La resistencia del potenciómetro no debe exceder de 20.000 ohmios. El eje del bastidor sobre el que se arrolla la bobina lo constituye ahora un tubo de latón de 5 cm de longitud que encaja con el eje del potenciómetro *(véase la ilustración superior de la página 115)*. Los soportes en forma de U, hechos con tubo de latón de 3 mm, se sueldan al eje rígido, igual que se hacía en el bastidor del motor de la pluma del tipo de D'Arsonval. El bastidor se aísla con cemento plástico, se arrolla una bobina idéntica y se le dota de un brazo con pluma. El potenciómetro se monta con el eje hacia arriba sobre una base de madera. El imán permanente se fija a un bloque de madera unido a la base.

Se conecta el potenciómetro a una fuente de tensión de unos 15 V. Se conecta un voltímetro entre un terminal de la fuente y el brazo deslizante del potenciómetro, girando luego el eje del potenciómetro hasta que el voltímetro indique exactamente la mitad de la tensión de la fuente. Sin modificar la posición del eje, se hace girar sobre él el tubo de latón del conjunto de la bobina hasta que el eje horizontal de ésta forme un ángulo recto con el campo magnético.

Aunque este servomotor es más potente que el tipo de D'Arsonval, no puede accionar un dispositivo de escritura de alto rozamiento, como un lápiz o una tiza. Las plumas con punta de fieltro duro o de plástico poroso funcionan bien. Sin embargo, en términos de respuesta de frecuencia conviene hacer mínima la masa del conjunto, sobre todo en el extremo del brazo de la pluma, por lo que, cuando empleo una pluma de fieltro, separo la mayor parte del cuerpo y conservo solamente la punta y el depósito de tinta. Con este servomotor no suele requerirse contrapeso.

El circuito electrónico del registrador incluye tres amplificadores que están interconectados formando un lazo cerrado. La señal a registrar se aplica al terminal de entrada de un amplificador sumador *(véase la ilustración de la página anterior)*. El amplificador sumador puede aceptar dos señales de entrada, amplificando su suma algebraica. La salida del amplificador sumador se introduce en la entrada del amplificador de potencia que acciona el motor de la pluma. El potenciómetro, que está unido mecánicamente al eje del motor, desarrolla una tensión que varía en amplitud y polaridad de acuerdo con la posición del eje.

La tensión del potenciómetro, que se conoce como tensión de realimentación,



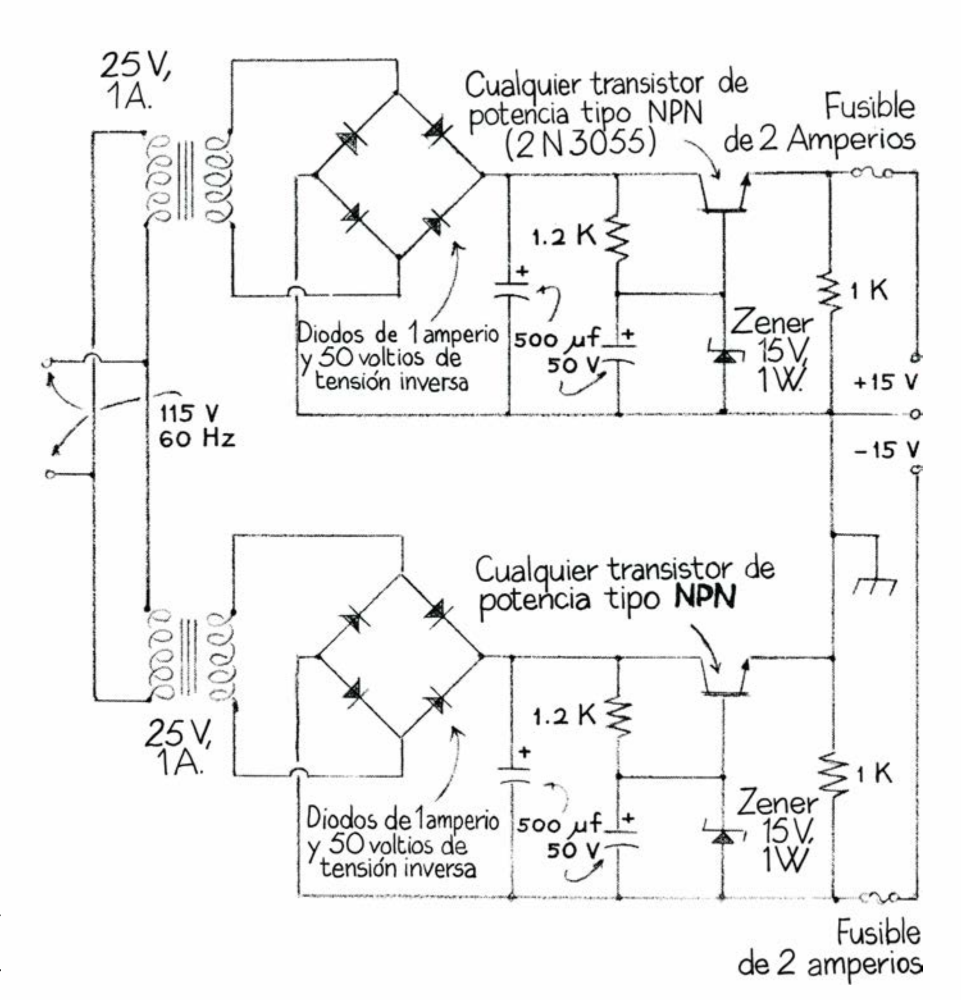
Esquema del circuito del amplificador de potencia

se aplica a un terminal de entrada en un amplificador diferencial. El amplificador diferencial puede aceptar dos señales de entrada, amplificando su diferencia algebraica. La salida del amplificador diferencial se aplica al segundo terminal de entrada del amplificador sumador, cerrándose así el lazo.

Una tensión de referencia ajustable, desarrollada en un potenciómetro conectado a la fuente de alimentación, se aplica al segundo terminal del amplificador diferencial. En ausencia de señal a registrar, la diferencia amplificada entre la tensión de realimentación y la tensión de referencia se aplica, a través del amplificador-sumador, al amplificador de potencia. Alimentado de este modo, el motor de la pluma gira para situarse en aquella posición que reduzca a cero la diferencia entre la tensión de realimentación y la de referencia, deteniéndose así el motor. Si la tensión de referencia se modifica manualmente, la tensión diferencia resultante hace que el motor busque de nuevo aquella posición en la que la diferencia de tensiones se reduce a cero. Por lo tanto, la pluma del registrador puede colocarse en el punto del papel que se desee, ajustando la tensión de referencia.

Una señal aplicada al amplificador sumador alimenta de la misma forma al amplificador de potencia. El motor busca una posición en la que la suma de la tensión de señal y la tensión diferencia se reduzca a cero. Las tensiones en el lazo de realimentación se amplifican automáticamente, con el resultado de que el sistema tiende a aplicar al motor la potencia que éste necesita para mover la pluma, con independencia de las variaciones que se produzcan en el rozamiento entre la punta y el papel.

Aunque el sistema tiene 82 transistores, su construcción es bastante sencilla. A excepción de dos de ellos, los demás se incluyen en circuitos integrados que forman cuatro amplificadores operacionales. Los circuitos integrados tienen un tamaño muy reducido, son muy baratos y pueden obtenerse fácilmente, al igual que los diodos, resistencias, condensadores y demás elementos de los circuitos, en las tiendas dedicadas a la venta de componentes electrónicos para radio y televisión. El circuito 741 se ofrece en varias presentaciones físicas, aparte de la de cápsula metálica representada en la figura. La más habitual ahora es una pastilla rectangular de plástico o cerámica con patillas para la conexión. El tipo 747 contiene dos amplificadores 741 en la misma pastilla. Junto con los circuitos concretos que vayan a utilizarse, obténganse las indicaciones de la forma en que están conectados los amplificadores a las patillas, para poder montarlos correctamente en el esquema.



Conjunto de la fuente de alimentación

Los circuitos electrónicos deben construirse y probarse por separado. Móntese, en primer lugar la fuente de alimentación regulada.

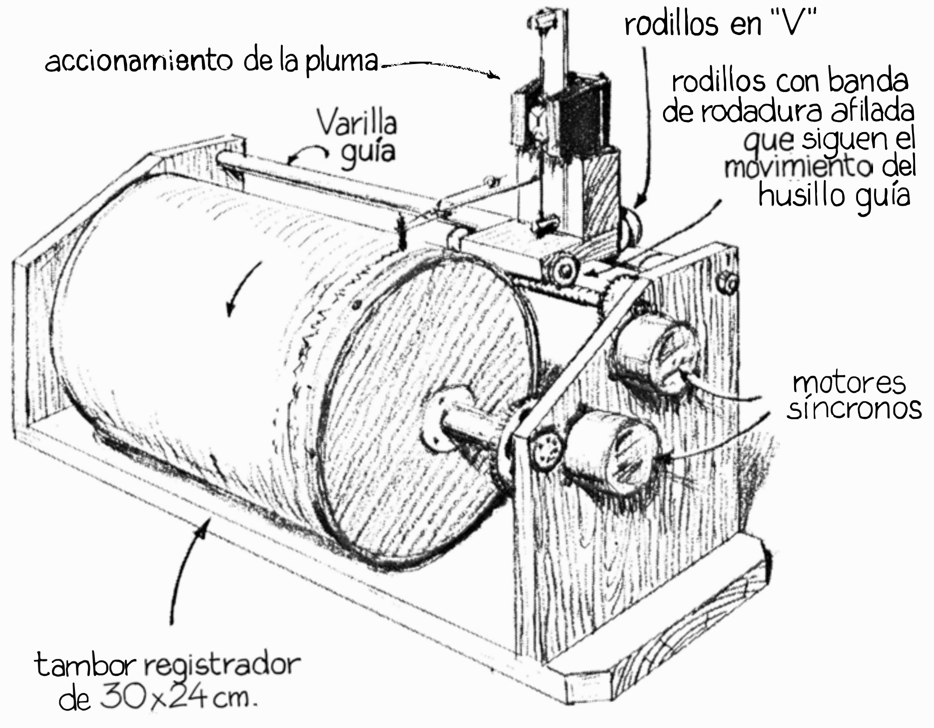
No olvidar los fusibles. La tensión de la fuente no debe modificarse en más de un 1 o 2 % cuando se conecte a la salida una resistencia de 30 ohmios. La resistencia habrá de ser capaz de disipar alrededor de 30 vatios.

Constrúyase a continuación el amplificador de potencia. Comprobar minuciosamente un par de veces por los menos que el cableado reproduce fielmente el esquema (*véase página precedente*). Quitar uno de los fusibles, conectar el circuito a la fuente de alimentación y, con un voltímetro, ajustar el potenciómetro de polarización para obtener a la salida una tensión de 0,5 V respecto a masa. Volver a colocar el fusible y ajustar del mismo modo la polarización del circuito complementario.

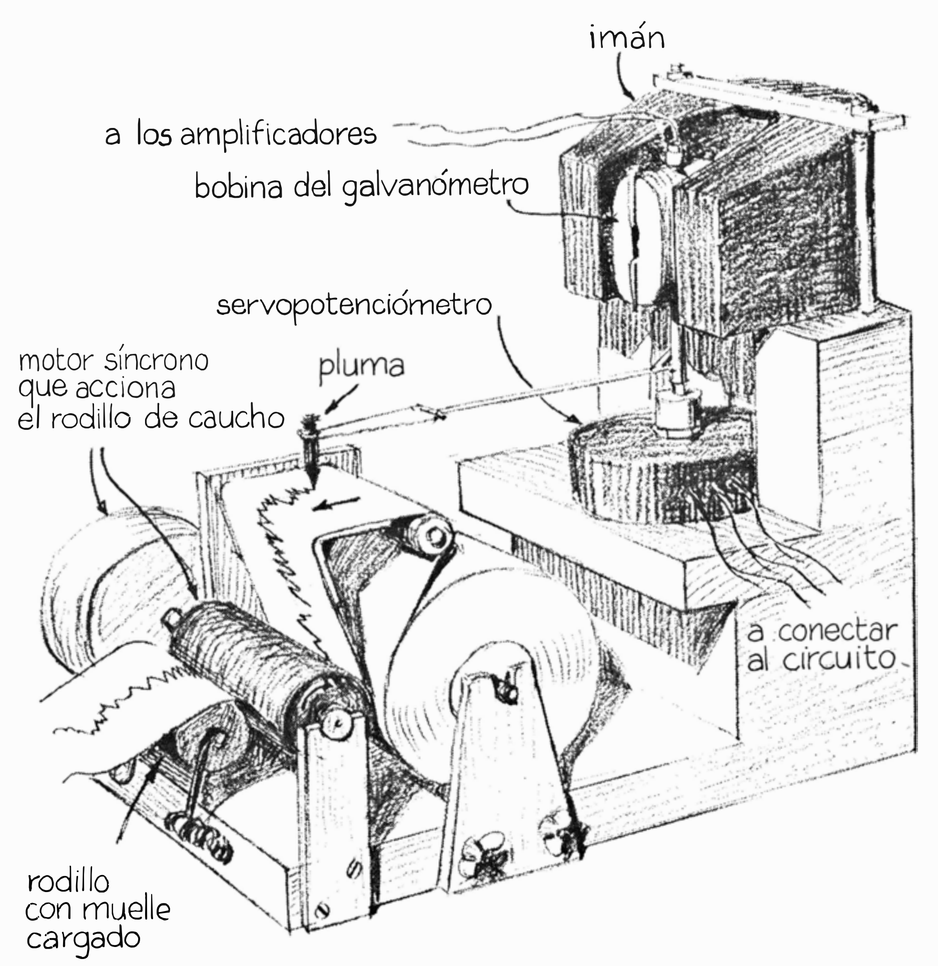
Hacer un ensayo de funcionamiento de amplificador conectando la salida a una carga de prueba y aplicando potencia. Yo utilizo como carga un pequeño motor de corriente continua cuya tensión nominal es de 30 V. Conectar un potenciómetro de 5000 ohmios a la fuente de alimentación y conectar el cursor del potenciómetro a la entrada del amplificador. Si el amplificador funciona adecuadamente, la velocidad del motor y su sentido de rotación pueden controlarse girando el eje del potenciómetro. Por cierto, los transistores de potencia tanto de la fuente como del amplificador de potencia deben montarse sobre asientos con grandes aletas para refrigeración. Sin radiadores adecuados, los transistores de potencia se quemarían rápidamente.

Por último, móntense los circuitos de los amplificadores diferencial y sumador. No aplicar tensión a esta unidad hasta no haber comprobado por tres veces que su cableado corresponde al esquema del circuito. El no hacerlo puede costarle a usted los amplificadores, como yo he aprendido por triste experiencia.

Pruebe los amplificadores conectando un voltímetro a la salida y aplicando tensión a la entrada por medio de un po-



El tambor registrador



Registrador sobre cinta de papel

tenciómetro cableado como divisor de tensión. Después de completar los ensayos, conéctese la salida del amplificador sumador a la entrada del amplificador de potencia, así como el motor de la pluma a la salida del amplificador de potencia y el cursor del potenciómetro de realimentación al terminal de ajuste de fase del amplificador diferencial. Poner todos los potenciómetros en su posición media, excepto los de polarización, que ya fueron ajustados previamente. Todos los terminales de tierra del sistema deben interconectarse, incluso el de la fuente de alimentación.

Aplicar tensión al sistema. Operar el potenciómetro de ajuste de cero, que suministra la tensión de referencia. Si la pluma no puede centrarse sobre el papel operando este control, es probable que la polaridad del potenciómetro esté invertida. Intercambiar las conexiones del potenciómetro con la fuente de alimentación. Centrar la pluma. Estando aplicada la tensión, separar la pluma de la posición cero con el dedo y soltarla. La pluma deberá volver rápidamente a la posición cero y detenerse sin sobreoscilación. Si no vuelve con prontitud, aumentar la ganancia del lazo hasta un valor para el que la pluma oscile, y reducir luego ligeramente la ganancia. Desviar súbitamente la pluma. Deberá moverse unas cuantas veces a un lado y otro de la posición cero.

A continuación, muévase el potenciómetro de ajuste de fase en la dirección que detenga la oscilación. El efecto de este dispositivo es permitir que el sistema prevea lo que va a ocurrir a continuación. Lo que hace es aumentar la ganancia del lazo conforme aumenta la frecuencia de la tensión de realimentación, modificando también las relaciones de fase de las corrientes de la red.

Las posiciones adecuadas de este potenciómetro y del de la ganancia del lazo deben encontrarse experimentalmente. El ajuste correcto puede requerir numerosas repeticiones. Cuando ambos están bien hechos, la pluma volverá a cero y se parará sin oscilación cuando se la aparte de la posición de cero y se la suelte. Este circuito fue montado con los componentes que yo tenía a mano. Los valores de las resistencias se determinaron experimentalmente. Es muy posible que los valores elegidos no sean los óptimos en todos los casos. Sin duda el sistema puede mejorarse con pruebas posteriores.

Los mecanismos de arrastre del papel que yo he construido son de dos tipos Uno de ellos lo hace en forma de cilindro de papel. Empleo esta unidad para re-

gistrar sismogramas. El segundo mecanismo hace deslizarse bajo la pluma una cinta de máquina sumadora. Lo uso, sobre todo, para registrar señales transitorias de mayor frecuencia, tales como los potenciales bioeléctricos. Ambas unidades pueden fabricarse con herramientas ordinarias de mano.

El tambor que soporta el papel cilíndrico se construyó a partir de un tubo fenólico de la clase empleada para montajes telescópicos. Los extremos se cerraron con madera contrachapada. El eje sobre el que gira el tambor debe centrarse con cuanta precisión sea posible, y, aún así, la pluma articulada no describirá circunferencias perfectas. El papel debe pegarse al tambor con cinta adhesiva.

El husillo que hace avanzar el carro del motor a través del tambor es un perno recto que puede encontrarse en muchas ferreterías. El tambor y el husillo pueden girar independientemente, accionándose mediante motores síncronos, o por medio de correas o piñones según los deseos del propio experimentador.

Para registrar terremotos yo prefiero motores síncronos *(véase la ilustración superior de la página anterior).*

El mecanismo de arrastre del papel de máquina sumadora es algo más pequeño que el dispositivo de tambor y más fácil de fabricar. El soporte sobre el que se escribe consiste en una chapa de acero doblada en ángulo agudo y soldada por un lado a una placa vertical unida a la base *(véase la ilustración inferior de la página anterior).* El papel se arrastra sobre el soporte por medio de un rodillo de goma. El rodillo se fabrica con tubo de caucho de pared dura montado sobre un eje.

Un rodillo con un resorte cargado, hecho también de tubo de caucho, aumenta el rozamiento entre el papel y el rodillo motriz.

Es normal que al experimentador le interese temporizar la señal registrada. Yo lo consigo accionando el mecanismo de arrastre del papel con un motor síncrono, una disposición que automáticamente da al grafo una base de tiempo conocida. El experimentador puede montar un motor de velocidad variable y registrar marcas de tiempo junto con la señal.

Esta operación puede llevarse a la práctica introduciendo señales de tiempo en un terminal de entrada de un amplificador sumador y la señal a registrar en el segundo terminal de entrada. Las señales así combinadas se introducen luego a la entrada del registrador.

Libros

De la interacción de los fenómenos biológicos y culturales resulta el fenómeno humano

Tito A. Varela

ANTROPOLOGÍA FÍSICA. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DEL HOMBRE, J. Z. Young. Ed. Vicens Vives, Barcelona 1976. La interacción de los fenómenos biológicos y culturales da como resultado el fenómeno humano. El primero de tales aspectos presenta un alto grado de objetivación, tanto por lo que respecta a su nivel cualitativo cuanto por lo que mira a su nivel cuantitativo. No obstante, para su conocimiento es necesario someterlo al rigor de la experiencia a fin de obtener su verificación. En biología, como en las restantes ciencias experimentales, no basta con la veracidad de un hecho constatada sólo por la lógica y la razón, necesita, además, pasar por el filtro del proceso experimental. Existen, sin embargo, caracteres biológicos cuya objetivación y nivel de experimentación resultan, a la luz de los conocimientos actuales, extremadamente complicados, y, en algunos casos, no es posible su valoración. Estamos apuntando a fenómenos tales como la conducta, el pensamiento, la inteligencia, etc. Las dificultades del análisis vienen condicionadas por las cualidades intrínsecas del carácter y por la fuerte incidencia del fenómeno cultural en los mismos. Nos adentramos así en el complicado campo de las relaciones interdisciplinarias de las dos grandes vertientes del proceso humano: la antropología biológica y la antropología cultural. Cabe considerar algún otro nivel de estudio, amén de los anteriormente mencionados; pero será consecuencia de los criterios generales tomados como base de clasificación. Criterios que pueden extenderse a placer y, con ellos, la sistemática de los niveles de estudio.

En la confrontación de los dos niveles, el biológico y el cultural, se encuentra una de las aportaciones más interesantes y sugerentes de este libro. El autor nos introduce en el complejo mundo de las interrelaciones de ambas antropologías y pone de relieve los complejos problemas que se plantean ante la incidencia de ambos aspectos.

La biología humana no se aborda dentro de un marco de ceñida especialización. Pero Young analiza con claro y absoluto rigor científico las bases biológicas que nos van a situar en otros capítulos con el bagaje necesario para afrontar el conocimiento de la realidad humana. El autor se plantea la estructuración y exposición lógica del contenido del libro, inclinándose por el criterio de la exposición de las leyes generales de los procesos vitales y los principios que rigen la evolución biológica de la vida, del hombre y de la propia cultura.

Los primeros capítulos tratan de las leyes fisicoquímicas que regulan el fenómeno biológico. Previo análisis de las dificultades que entraña el sometimiento a una técnica metodológica, el estudio de la realidad humana se sitúa dentro de una concepción materialista. Al afirmar que el hombre posee las mismas partículas que pueden constituir, por ejemplo, la planta o la piedra, se inscribe plenamente en esa línea; pero reconoce que el hombre constituye un fenómeno sumamente complejo, cuya total comprensión no puede deberse a unas puras coordenadas fisicoquímicas.

La actividad vital es considerada, sobre todo, bajo sus aspectos básicos, cual la homeostasis. Los intercambios entre el organismo y el medio, y su adecuación a éste por parte de aquél, se va a perpetuar de manera ininterrumpida en toda la escala zoológica, independientemente del cambio sufrido por las individualidades. El individuo como entidad particular desaparece; persistirá, sin embargo, la organización de procesos que caracterizan el fenómeno vital.

Analiza a continuación el problema del crecimiento, y comienza por plantear la valoración de esta idea, que se ha interpretado de múltiples formas en el campo de la biología. Define el crecimiento como "la adicción material a lo que ya está organizado como modelo biológico". Las páginas dedicadas a este problema están medidas con profundidad, y hace especial hincapié en la variabilidad del ritmo del crecimiento, terminando con la complicada ontogenia del cerebro y del pensamiento. El fenómeno final del crecimiento, la vejez, enlaza, en la pluma de Young, con la biodemografía, donde estudia de una forma exhaustiva toda la problemática de este proceso en la dinámica y evolución de la población humana.

Estudia la evolución a partir de los orígenes de la tierra, pasando por el origen de la vida, para culminar con la anagénesis, que nos introduce en el capítulo histórico de los Primates y, más concretamente, en la bifurcación de los Póngidos y los Homínidos, momento a partir del cual el autor expone de forma más exhaustiva la complicada aventura del fenómeno humano. En este sentido, señala los procesos ambientales como desencadenantes de la diferente acción selectiva y la incidencia directa en la adquisición y transformación de las características típicamente humanas (la fabricación de utensilios, la postura erecta y el lenguaje).

El desarrollo cultural se contempla desde sus primeras manifestaciones de creación, que definen como tal a esta estructura de la última etapa biológica de los homínidos, hasta las últimas y complicadas formas de abstracción.

Cierra la obra el análisis de la variabilidad y las causas de la misma, siendo ésta resultado de la acción conjunta de los factores genético y ambiental. Existen caracteres cuya influencia genética es prácticamente total, mientras que en otros es el ambiente el factor determi-

nante. La delimitación de ambos factores se consigue a través del análisis de gemelos y poblaciones no emparentadas, en situaciones ambientales diferentes. En el contexto del factor genético, se estudia la incidencia de factores tales como la selección natural, la deriva genética y la consanguinidad en la dinámica de las poblaciones.

ANTROPOLOGIA FILOSOFICA. EL HOMBRE Y SUS PROBLEMAS. Luis Farré, Editorial Guadarrama, Madrid 1976³. La antropología filosófica es, hoy, un auténtico cajón de sastre al que van a parar todos los conocimientos difícilmente adscribibles a un saber empírico. Tras la cruda crítica del neopositivismo contra la especulación no verificable ni falseable, a no ser por puras tautologías, que según dicha corriente encuentra su baluarte principal en la metafísica, los ontólogos o filósofos no analíticos se han pasado en peso al antropologismo. La antropología filosófica ha aparecido en las escuelas como el ángel salvador. A ella se apuntan no sólo los filósofos de todas las escuelas especulativas (Landmann, Cassirer, Marías, Farré) sino otros que proceden de ramas más pragmáticas (sociología, psicología, medicina inclusive).

El apoyo "científico" de los primeros suele ser un bellísimo libro de Jacob von Uexkull *(Theoretische Biologie)* traducido por la Revista de Occidente, que Ortega se encargó de divulgar y sacarle peculiares consecuencias. Y, en menor escala, las obras de Max Scheler (alguna traducida también por la misma editorial madrileña) y Merleau-Ponty. También acuden a obras de antropología cultural (Levi-Strauss) y al psicoanálisis (Freud). Una vez leídas y compendiadas esas fuentes, con leves escarceos paleontológicos de la mano de Teihlard de Chardin y escoliastas, los antropólogos dan el gran salto adelante que consiste en comentar las famosas preguntas de Kant con las contrapreguntas de Heidegger. El lector recordará que las preguntas sobre las que gira la antropología filosófica kantiana y poskantiana son las siguientes: "El campo de la filosofía en esta significación mundana se puede reducir a los siguientes temas 1) ¿Qué puedo saber?, 2) ¿Qué debo hacer? 3) ¿Qué debo esperar?, 4) ¿Qué es el hombre? A la primera cuestión responde la metafísica, a la segunda la moral, a la tercera la religión y a la cuarta la antropología. Pero en el fondo se podría poner todo esto en la cuenta de la antropología, porque las tres primeras cuestiones se refieren a la última" M. KANT, *Sobre el saber filosófico).* Apoyando o rechazando ese planteamiento del problema, tal ha sido el quicio de las antropologías al uso en Occidente desde finales del siglo XVIII.

Pero no cuesta nada poner en duda la validez de esa posición, de ese punto de arranque y de convergencia. Basta con volver a los orígenes del saber humano, en las costas jónicas. Había quienes, por supuesto, abonaron ya el camino en la dirección anterior: Protágoras ("El hombre es la medida de las cosas"), Sócrates, que incorporó en su vida el oráculo délfico ("Conócete a ti mismo"), Platón, etcétera. Pero coexistió asimismo otra corriente, que se inicia turbiamente en los pitagóricos, que va ganando en claridad en los médicos de la secta y que se hace diáfana en los escritos biológicos de Aristóteles y, sobre todo, en el *Sobre el alma,* del Estagirita. La *psijé* aristotélica (alma, en griego) es el principio vital, el sistema o el orden que dirían los bioquímicos termodinámicos de nuestros días. El impulso religioso, vigorosísimo, que viniera después hizo olvidar este capítulo y esta perspectiva tan fecunda del padre de la filosofía occidental.

Pero la historia registra que se impuso la vía excesivamente especulativa, desentendiéndose bastante, mucho, de la realidad y de su análisis reiterativo. Los árabes, al comentarlo, perdieron la segunda oportunidad. Estamos asistiendo en nuestros días a la tercera oportunidad, en que los filósofos de la ciencia (Marjorie Grene) han echado su mirada atónita a la proeza del educador de Alejandro Magno. Pero se han centrado, por ahora, en los paradigmas biológicos, sin descender a su concepción genuina del hombre, que, antes que cualquier otra especificación, era, para Aristóteles, animal *(thoón),* sometido, por tanto, a las mismas reglas taxónomicas y sistemáticas que los animales con sangre. Con el género por delante, la especificidad de *político,* comunitario, sometido a unas leyes con muchos más grados de libertad que las normas férreas que dicta la naturaleza a los otros seres vivos. Así, la ética y la política o el derecho no son para Aristóteles otras cosas que proyecciones reales, creaciones del hombre y de la naturaleza en tanto en cuanto son del hombre, porque éste es naturaleza.

Luis Farré es profesor de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina) y ha articulado en este libro las grandes líneas de la antropología que, con Marías, podríamos llamar *metafísica.* Pero una Antropología total, una antropología filosófica, no tiene porqué ceñirse a aspectos estancos. Debe asumir el modelo antropológico *físico* (comentado por Tito Varela en estas páginas), el *cultural* (y con él, el artístico, el religioso etcétera) y el *metafísico,* para poder vertebrar y ubicar las distintas secciones en su lugar correspondiente. Por metafísico entendemos aquí todo cuanto responde prioritariamente a la llamada del *politikós* (ética, sociología, historia, etcétera, con sus temas primarios o substantes: persona, racionalidad).

ANTROPOLOGIA DE LOS PUEBLOS IBEROAMERICANOS. Juan Comas. Biblioteca Universitaria Labor, Barcelona 1974. Aunque el autor limita su propósito a una antropología física o biológica, para entendernos, no cabe duda que suministra una importante información en otros terrenos: demografía, antropología cultural, antropología social e historia iberoamericana inclusive. En ello estriba la fecundidad de esta obra, que, partiendo de unos presupuestos paleontológicos, genéticos y poblacionales (en el sentido biológico o evolutivo), irradia y proyecta su visión del hombre iberoamericano en toda su amplitud de manifestaciones.

La antropología no goza entre nosotros de una tradición decorosa. A no ser la escuela de prehistoriadores, con Bosch Gimpera al frente, los antropólogos propiamente dichos brillaron por su ausencia en España. Venturosamente no ha ocurrido así con los países iberoamericanos, que cuentan con dignos institutos y facultades, en una de las cuales, la de la Universidad de México, enseña el profesor Comas. Los trabajos del campo que realizan actualmente las facultades de Ciencias Biológicas, en España, suelen limitarse a la antropología cuantitativa, descuidando por falta de medios otras vertientes tan importantes como la paleoantropología y la antropogenética.

Abundan en el estudio de Comas las vertientes étnicas y culturales de la antropología, que ocupan dos de las tres partes de que consta la obra. Desde una situación de apenas comunicación exterior, por tanto de una endogamia cerrada, se pasa, con la conquista, a una exogamia cuyo punto crítico máximo se alcanzará con las migraciones europeas del siglo pasado. El autor no se ha ceñido, pues, al coto restringido de la antropología física con sus cuatro vertientes principales: ecología humana, genética, evolución y antropometría, sino que ha asumido datos de otras ciencias más humanistas para vertebrar una obra modélica en su campo.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL REPROCESADO DE LOS COMBUSTIBLES NUCLEARES

NUCLEAR CHEMICAL ENGINEERING. Manson Benedict y Thomas H. Pigford. McGraw-Hill Book Company, 1957.

ENGINEERING FOR NUCLEAR FUEL REPROCESSING. Justin T. Long. Gordon and Breach Science Publishers, Inc., 1968.

ENVIRONMENT EFFECT OF A COMPLEX NUCLEAR FACILITY. W. P. Bebbington en *Chemical Engineering Progress,* vol. 70, n.º 3, págs. 85-86; marzo, 1974.

REPROCESSING–WHAT WENT WRONG? Simon Rippon en *Nuclear Engineering International,* vol. 21, n.º 239, págs. 21-31; febrero, 1976.

POSTEFECTOS NEGATIVOS EN LA PERCEPCION VISUAL

COMPARISON OF NORMALIZATION THEORY AND NEURAL ENHANCEMENT EXPLANATION OF NEGATIVE AFTEREFFECTS. Ray Over en *Psychological Bulletin,* vol. 75, n.º 4, págs. 225-243; abril, 1971.

HANDBOOK OF PERCEPTION, VOL. I: HISTORICAL AND PHILOSOPHICAL ROOTS OF PERCEPTION. Dirigido por Edward C. Carterette y Morton P. Friedman. Academic Press, 1973.

SIGHT AND MIND: AN INTRODUCTION TO VISUAL PERCEPTION. Lloyd Kaufman. Oxford University Press, 1974.

WHAT DOES VISUAL PERCEPTION TELL US ABOUT VISUAL CODING? Stuart M. Anstis en *Handbook of Psychobiology,* Dirigido por Michael S. Gazzaniga y Colin Blakemore. Academic Press, 1975.

HELIO 3 SUPERFLUIDO

AN INTRODUCTION TO LIQUID HELIUM. J. Wilks. Clarendon Press, 1970.

EXPERIMENTAL PROPERTIES OF SUPERFLUID ^{3}HE. John C. Wheatley en *Reviews of Modern Physics,* vol. 47, n.º 2, págs. 415-470; abril, 1975.

A THEORETICAL DESCRIPTION OF THE NEW PHASES OF LIQUID ^{3}HE. Anthony J. Leggett en *Reviews of Modern Physics,* vol. 47, n.º 2, págs. 331-414; abril, 1975.

HELIUM THREE. John C. Wheatley, en *Physics Today,* vol. 29, n.º, 2, págs. 32-42; febrero, 1976.

THE NEW PHASES OF ^{3}HE. A. J. Leggett en *Endeavor,* vol. 35, n.º 125, págs. 83-87; mayo, 1976.

EL CONTROL DE LA MARCHA

INSECT WALKING. Donald M. Wilson en *Annual Review of Entomology,* vol. 11, págs. 103-122; 1966.

NERVOUS CONTROL OF WALKING IN THE COCKROACH. K. G. Pearson, C. R. Fourtner y R. K. Wongen *Control of Posture and Locomotion,* dirigido por R. B. Stein, K. G. Pearson, R. S. Smith y J. B. Redford. Plenum Press, 1973.

LOCOMOTION IN VERTEBRATES: CENTRAL MECHANISMS AND REFLEX INTERACTION. S. Grillner en *Physiological Reviews,* vol. 55, n.º 2, págs. 247-304; abril, 1975.

SUPERNOVAS EN OTRAS GALAXIAS

THE SPECTRA OF SUPERNOVAE. Robert P. Kirshner, J. B. Oke, M. V. Penston y Leonard Searle en *The Astrophysical Journal,* vol. 185, n.º 1, parte 1 págs. 303-322; octubre 1, 1973.

THE SPECTRA OF SUPERNOVAE. J. B. Oke y Leonard Searle en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 12, págs. 315-329; 1974.

INSERCION DEL ADN VIRICO EN EL ADN DE LA CELULA HUESPED

THE LINEAR INSERTION OF A PROPHAGE INTO THE CHROMOSOME OF *E. COLI* SHOWN BY DELETION MAPPING. Naomi C. Franklin, William F. Dove y Charles Yanofsky en *Biochemical and Biophysical Research Communications,* vol. 18, n.^{os} 5-6, págs. 910-923; marzo 12, 1965.

EPISOMES. Allan M. Campbell. Harper & Row, Publishers, 1969.

THE BACTERIOPHAGE LAMBDA. Dirigido por A. D. Hershey. Cold Spring Harbor Laboratory, 1971.

NOTE ON THE STRUCTURE OF PROPHAGE λ. Phillip A. Sharp, Ming-Ta Hsu y Norman Davidson en *Journal of Molecular Biology,* vol. 71, n.º 2, págs. 499-501; noviembre 14, 1972.

INTEGRATIVE RECOMBINATION OF BACTERIOPHAGE LAMBDA DNA *IN VITRO.* Howard A. Nash en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 72, n.º 3, págs. 1072-1076; marzo, 1975.

DNA INSERTION ELEMENTS, PLASMIDS AND EPISOMES. Dirigido por A. I. Bukhari, J. Shapiro y S. Adhya. Cold Spring Harbor Laboratory, en prensa.

EL ARTE DE LOS IBEROS: ESCULTURA Y PINTURA

ARTE IBERICO. A. García y Bellido, en *Historia de España,* dirigida por Menéndez Pidal, III. Espasa Calpe, Madrid 1946.

ARTE IBERICO. Miquel Tarradell. Polígrafa, Barcelona 1968.

LES IBÈRES, ART ET CIVILITZATION, G. Nicolini. Fayard, París 1973.

DATACION MEDIANTE HUELLAS DE FISION

THE USE OF APATITE AND SPHENE FOR FISSION TRACK AGE DETERMINATIONS. C. W. Naeser en *Geological Society of America Bulletin,* vol. 78, n.º 12; diciembre, 1967.

CHARGED PARTICLE TRACKS: TOOLS FOR GEOCHRONOLOGY AND METEORITE STUDIES. Robert L. Fleischer, P. Buford Price y Robert M. Walker en *Radiometric Dating for Geologists,* dirigido por E. I. Hamilton y R. M. Farquhar. Interscience Publishers, John Wiley & Sons, 1968ı

FISSION TRACK DATING OF VOLCANIC GLASSES AND THE THERMAL HISTORY OF ROCKS. D. Storzer en *Earth and Planetary Science Letters,* vol. 8, n.º 1, págs. 55-60; marzo, 1970.

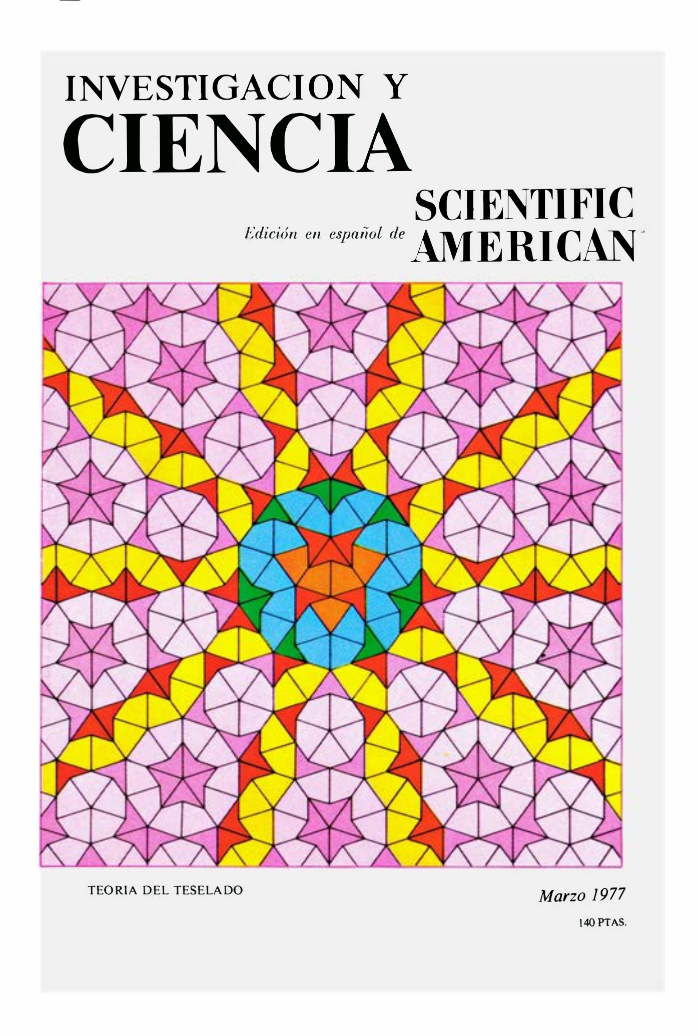
JUEGOS MATEMATICOS

DIMENSION THEORY. Witold Hurewicz y Henry Wallman. Princeton University Press, 1941.

SNOWFLAKE CURVES. Bruce W. King en *The Mathematics Teacher,* vol. 57, n.º 4, págs. 219-222; abril, 1964.

A GENERALIZATION OF THE VON KOCH CURVE. Joel E. Schneider en *Mathematics Magazine,* vol. 38, n.º 3, págs. 144-147; mayo, 1965.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ABORTO LEGAL, Christopher Tietze y Sarah Lewit

De 30 a 35 millones de abortos, legales e ilegales, se llevan a cabo hoy día en el mundo. La legalización, con mayores o menores restricciones, en países que contabilizan los dos tercios de la población mundial ha permitido la reducción de lo que era un foco constante de infección y muerte.

AGRICULTURA SIN LABRANZA, Glover B. Triplett, Jr., y David M. Van Doren, Jr.

Dentro de pocos años, muchas de las tierras cultivables se podrán plantar sin recurrir al arado. En la mayoría de las situaciones, plantar sin labranza (pero con herbicidas) puede ahorrar trabajo, energía agua y suelo.

LA MECANICA CUANTICA DE LOS AGUJEROS NEGROS, S. W. Hawking

Suele definirse a los agujeros negros como las zonas de las que nada, ni siquiera la luz, puede escaparse. Hay razones para creer que las partículas pueden escapar de su malla.

EL LADO DE UNION DE LOS ANTICUERPOS, J. Donald Capra y Allen B. Edmundson

Cuando un antígeno, o una substancia extraña, se combina con una molécula del anticuerpo, lo hace en un sitio donde encaja exactamente, como encaja una llave en la cerradura. La naturaleza de dicho sitio se ha resuelto con gran detalle.

LA PERCEPCION DE OBJETOS EN MOVIMIENTO, Robert Sekuler y Eugene Levinson

En el sistema visual humano existen circuitos nerviosos altamente especializados que permiten separar la información referente a la dirección en que un objeto se está moviendo de los detalles referentes a la forma del objeto.

EXOELECTRONES, Ernest Rabinowicz

Hay exoelectrones emitidos por una superficie metálica activa. Tales superficies se crean por desgaste o fisura, unido a un proceso de fatiga.

FORMACION DE CRATERES EN EL SISTEMA SOLAR, William K. Hartmann

La era de la exploración espacial ha mostrado que algunos cráteres, como los de la luna, constituyen una característica común a todos los cuerpos del sistema solar interior.

LA PRODUCTIVIDAD DE PRADOS MEDITERRANEOS, Arturo Caballero, Francisco Gil y Miquel Berbel

Una aplicación racional de técnicas basadas en el comportamiento de pratenses de clima templado, cultivadas en zona mediterránea, aproxima las producciones reales netas a las potenciales máximas.

